Numero RAE:	Fecha de Elaboración: 09 / 12 / 2010	
Paginas: 125		Año: 2010
Título:	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN LEVITADOR ACÚSTICO, MEDIANTE EL PRINCIPIO DE ONDA ESTACIONARIA, APLICADO A TRANSPORTE SIN CONTACTO	
Autores:	David Octavio Medrano Daniel Felipe Ruiz	
Publicación:	Biblioteca Fray Alberto Montealegre Gonzáles, Universidad De San Buenaventura (Bogotá)	
Unidad Patrocinante:	Facultad De Ingeniería	
Palabras Clave:	Levitación, Onda Estacionaria, Longitud de Onda, Nodos de Presión, Resonador de Helmholtz, Frecuencia de Resonancia, Cámara Resonante, Energía Acústica.	
Descripción:	Este proyecto fue realizado por estudiantes de la carrera Ingeniería de Sonido de la Universidad de San Buenaventura sede Bogotá, con el fin de desarrollar un levitador acústico que emplea un resonador de Helmholtz y un sitema electroacústico con el fin de lograr un estado levitatorio en	

	base a los nodos de presión producidos por una onda estacionaria.
Objetivo General:	Construir un levitador acústico, mediante el principio de onda estacionaria, aplicado al transporte sin contacto.
Objetivos Específicos:	• Determinar las características de los sistemas de transporte sin contacto basados en LACP (levitación acústica en campo próximo). • Delimitar las características de las muestras sometidas al campo sonoro para ser levitadas. • Definir las especificaciones técnicas necesarias tales como potencia, frecuencia de operación, amplitud. • Diseñar y construir el prototipo que cumpla con las condiciones propuestas.
Ejes Temáticos:	• Técnicas Levitación Acústica • Levitación por medio de Onda Estacionaria • Estado de Microgravedad Inducida
Áreas del Conocimiento:	Ingeniería, Tecnología y Áreas Relacionadas
Conclusiones:	• Se produjo levitación a 50 Hz con evidente facilidad respecto a 580 Hz, pese a que el dispositivo fue calculado a la segunda frecuencia en cuestión. Esto gracias a que es más importante excitar el recinto que influir la muestra, por ende las dimensiones del recinto y de la muestra son

	más importantes que la presión. • Todos los átomos, y la 'materia' que forman mediante sus agrupaciones coherentes, vibran en diferentes rangos de frecuencia dependiendo de su propia complejidad y densidad; una frecuencia baja permite un conglomerado denso de átomos, una frecuencia más alta crea una materia menos densa, más espaciada hacia el exterior y más refinada, con las frecuencias bajas se produce una compresión del medio gaseoso (aire en este caso), una variación en el volumen pero no en la masa, teniendo como resultado una densidad mayor que la inicial la cual será la propicia para la levitación. • Las frecuencias bajas son más prominentes a largas distancias, estas no se ven afectadas de gran manera por los cambios en el medio, por lo cual la excitación de la cámara se logrará más fácilmente con un menor nivel de presión sonora sin importar sus cambios de sección y de área en cada una de sus etapas. • La estabilidad de la muestra no se logra debido a las tres dimensiones por las cuales está conformado el dispositivo. Al existir acción directa únicamente sobre dos de los tres planos axiales se observa una descompensación energética en el punto de equilibrio teórico, impidiendo la

	compensación de la muestra en suspensión. • Los puntos máximos de levitación acústica de los nodos de presión L1x, L1y y el punto dentro de la longitud de onda en el cual la fuerza es ampliada (*kh*), son suficientes para contrastar la fuerza de la gravedad sin necesidad que la onda haya llegado a su punto de máxima presión λ/4. • Las muestras con formas irregulares muestran un comportamiento más receptivo a la excitación en la cámara, esto debido a las variaciones de energía sobre sus superficies. • Las láminas de plexiglass usadas en la construcción del aparato resultaron demasiado angostas para generar un encapsulamiento óptimo, lo que causa pérdidas de nivel de presión dentro de la cámara. • Las muestras empleadas en este dispositivo, y que tuvieron un comportamiento favorable, presentan una densidad mínima de acción de 20 Kg/m3.
Referencias Bibliográficas:	• P. Collas, M. Barmatz (1986), *Acoustic radiation force on a particle in a temperature gradient,* California State University. • C. Shipley (1989), *Acoustic levitation in the presence of gravity,* California Institute

of Technology.

• Ueha Sadayuki (2001), *Phenomena, theory and applications of nearfield acoustic levitation,* Precision and Intelligence Laboratory, Tokyo Institute of Technology.

• E.G. Lierke (2004), *Ultrasonic Levitator Manual,* Tec5USA Inc.

• Mercedes López-Pastor (2006), *Containerless reaction monitoring in ionic liquids by means of Raman microspectroscopy,* Departamento de Química Analítica, Universidad de Córdoba.

• Kamakura Laboratory (2006), *Ultrasound-Electronics and Electro-Acoustics,* University of Electro-Comunications Tokyo, Japan

• R.J. Townsend (2006), *Investigation of two-dimensional acoustic resonant modes in a particle separator,* School of Engineering Sciences, University of Southampton.

• Barmatz, M. (1984), *A new method for acoustic containerless processing of materials,* NASA Center: Jet Propulsion Laboratory.

• Eberhardt, R. (1999), *Acoustic levitation device for sample pretreatment in microanalysis and trace analysis,* Institute of Physical and Chemical Analysis, Max-

	Planck-Strasse, • Ling, M. (2006), *Acoustic Levitator as a Tool for X Ray Tomography.* • Rosell, I. (2000), *Caracterización acústica de resonadores de Helmholtz,* Departamento de Acústica, Universitat Ramon Lull Barcelona, España • Hatano, H. (1994), *Axisymmetric Analysis of a Tube- Type Acoustic Levitator by a Finite Element Method,* University of Tokio, Japan. • Gonzalez Gómez, I. (2002), *Estudio experimental de mecanismos básicos de interacción acústica entre partículas en aerosoles,* Instituto de Acústica C.S.I.C, Madrid, España.
Autores RAE:	David Octavio Medrano Daniel Felipe Ruiz

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN LEVITADOR ACÚSTICO, MEDIANTE EL PRINCIPIO DE ONDA ESTACIONARIA, APLICADO A TRANSPORTE SIN CONTACTO

DAVID MEDRANO

DANIEL FELIPE RUIZ

UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA,

FACULTAD DE INGENIERIA

INGENIERÍA DE SONIDO

BOGOTÁ D.C.

2010

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN LEVITADOR ACÚSTICO, MEDIANTE EL PRINCIPIO DE ONDA ESTACIONARIA, APLICADO A TRANSPORTE SIN CONTACTO

DAVID MEDRANO

DANIEL FELIPE RUIZ

Trabajo presentado como requisito para optar al título de Ingeniero de Sonido

UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA,

FACULTAD DE INGENIERIA

INGENIERÍA DE SONIDO

BOGOTÁ D.C.

2010

Nota de aceptación

Firma del jurado

Firma del jurado

Bogotá, 19 de noviembre de 2010.

Agradecemos a nuestras familias y amigos, a Alejandro La Rotta y José David Chaparro por su apoyo logístico.

También con especial atención al físico John Tindall, especialista en efectos especiales de Discovery Networks, por su gran colaboración y guía en el desarrollo del proyecto.

CONTENIDO

PAG

INTRODUCCIÓN 13

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 14

1.1 ANTECEDENTES 14

1.2 DESCRIPCIÓN Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA 19

1.3 JUSTIFICACIÓN 20

1.4 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN 21

1.4.1 OBJETIVO GENERAL 21

1.4.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS 21

1.5 ALCANCES Y LIMITACIONES DEL PROYECTO 21

1.5.1 ALCANCES 21

1.5.2 LIMITACIONES 21

2 MARCO DE REFERENCIA 23

2.1 MARCO CONCEPTUAL 23

2.1.1 FRECUENCIA 23

2.1.2 ONDA ESTACIONARIA 24

2.1.3 LONGITUD DE ONDA 25

2.2 MARCO TEÓRICO 26

2.2.1 LEVITACIÓN 26

2.2.1.1 LEVITACIÓN ÓPTICA 28

2.2.1.2 LEVITACIÓN ELECTROSTÁTICA 28

2.2.1.3 LEVITACIÓN MAGNÉTICA 29

2.2.1.4 LEVITACIÓN AERODINÁMICA 29

2.2.1.5 LEVITACIÓN ACÚSTICA 30

2.2.2 CARACTERÍSTICAS DE LOS SISTEMAS DE LEVITACIÓN ACÚSTICA EN CAMPO PRÓXIMO 35

2.2.2.1 FUERZA ACÚSTICA REQUERIDA 37

2.2.2.2 FUERZAS INCIDENTES 38

2.2.2.3 ONDA ESTACIONARIA GENERADA 41

2.2.2.4 FUERZA DE LEVITACION AXIAL 42

2.2.2.5 NODOS DE PRESIÓN 43

2.2.3 GEOMETRÍA RECTANGULAR 44

2.2.4 NIVEL DE POTENCIA ACÚSTICA (Lw) 47

2.2.5 NIVEL DE PRESIÓN ACÚSTICA (Lp) 47

2.2.6 SENSIBILIDAD 47

2.2.7 RESONADOR DE HELMHOLTZ 48

3. METODOLOGÍA 51

3.1 ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN 51

3.2 LÍNEA DE INVESTIGACIÓN DE USB / SUB - LÍNEA DE FACULTAD / CAMPO TEMÁTICO DEL PROGRAMA 51

3.3 TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN 52

3.4 HIPÓTESIS 52

3.5 VARIABLES **52**

3.5.1 VARIABLES INDEPENDIENTES **52**

3.5.2 VARIABLES DEPENDIENTES **52**

4. DESARROLLO INGENIERIL **53**

4.1 DELIMITACIÓN DE LA MUESTRA **53**

4.1.2 PRESELECCIÓN DE MATERIALES DE PRUEBA **53**

4.1.2.1 POLIESTIRENO EXPANDIDO **54**

4.1.2.2 PLÁSTICO **55**

4.1.3 SELECCIÓN DE MATERIAL DE MUESTRA **57**

4.2 FRECUENCIA DE RESONANCIA IDEAL **58**

4.3 NIVEL DE PRESIÓN SONORA REQUERIDO **60**

4.4 PARÁMETROS DE DISEÑO **62**

4.4.1 DIMENSIONES DEL DISPOSITIVO **62**

4.4.2 SECCIONES DEL DISPOSITIVO **63**

4.4.2.1 CAMARA RESONANTE **63**

4.4.2.2 GUÍA DE ONDA **63**

4.4.2.3 SECCIÓN CILÍNDRICA **63**

4.4.3 FRECUENCIA DE RESONANCIA DEL DISPOSITIVO **64**

4.5 EVALUACIÓN DE MATERIALES CONSTRUCTIVOS **66**

4.5.1 CÁMARA RESONANTE **66**

4.5.1.1 VIDRIO **66**

4.5.1.2 POLICARBONATO **67**

4.5.1.3 PLEXIGLASS (ACRÍLICO) 68

4.5.2 GUIAS DE ONDA 69

4.5.2.1 POLICLORURO DE VINILO (PVC): 70

4.5.3 ESTRUCTURA CILÍNDRICA 71

4.5.4 SELECCIÓN DE MATERIALES CONSTRUCTIVOS 71

4.5.5 CARACTERISTICAS DE LOS MATERIALES SELECCIONADOS 72

4.6 FUENTES SONORAS 73

4.6.1 CELESTION TRUVOX 1520 73

4.6.2 ELECTROVOICE EVM 15 DLX 75

4.6.3 GENERADOR DE FRECUENCIA 76

4.6.4 AMPLIFICADORES DE SEÑAL 77

4.7 DISEÑO PRELIMINAR 77

4.8 PROCESO CONSTRUCTIVO DEL DISPOSITIVO 80

5. RESULTADOS 89

5.1 MONTAJE DEL SISTEMA 89

5.2 PRUEBA DEL SISTEMA 90

5.3 MEDICIÓN DE VOLTAJE 94

5.4 MEDICIÓN DE CORRIENTE Y CÁLCULO DE POTENCIA 96

5.5 CARACTERISTICAS DEL SISTEMA A 50 HZ 98

5.5.1 LONGITUD Y NÚMERO DE ONDA DE 50 HZ 98

5.5.2 MINIMO DE ENERGÍA ACÚSTICA REQUERIDO 98

5.5.3 COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA A 50 HZ 101

5.6 MEDICION DE SPL DEL DISPOSITIVO 104

5.6.1 MEDICIÓN A 50 HZ 104

5.6.1.1 MEDICION A CAMPO ABIERTO 105

5.6.1.2 MEDICION AL DISPOSITIVO 106

5.6.2 MEDICION A 580 HZ 107

5.6.2.1 MEDICION A CAMPO ABIERTO 107

5.6.2.2 MEDICION AL DISPOSITIVO 108

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS 109

7 COSTO DE LA PROPUESTA 111

8 CONCLUSIONES 112

9 RECOMENDACIONES 114

BIBLIOGRAFIA 115

LISTA DE FIGURAS

PAG

Figura 1. Tubo de Kundt. 13
Figura 2. Cámara de levitación acústica de David Deak. 14
Figura 3. Modelo de cámara de levitación acústica 15
Figura 4. Levitación ultrasónica de peces. 16
Figura 5. Drying kinetics analyzer. 17
Figura 6. Gráfica de onda estacionaria. 23
Figura 7. Longitud de onda de una señal senosoidal. 25
Figura 8. Diagrama de neutralización de fuerza gravitatoria. 26
Figura 9. Dispositivo de levitación diamagnética 28
Figura 10. Configuraciones de hélice de acuerdo a flujos de aire. 29
Figura 11. Ley de la reflexión de ondas. 30
Figura 12. Principio de levitación acústica. 31
Figura 13. Sonido No lineal y Levitación Acústica 32
Figura 14. Orientación de la gravedad en una geometría rectangular 43
Figura 15. Resonador Helmholtz 45
Figura 16. Circuito equivalente resonador Helmholtz 46
Figura 17. Láminas de poliestireno expandido 49
Figura 18. Esfera de Poliestireno expandido. 50
Figura 19. Generador de frecuencias. 51
Figura 20. Parlante Celestion Truvox 1520 54
Figura 21. Respuesta en frecuencia Celestion Truvox 56
Figura 22. Parlante Electrovoice EVM 15 DLX 56
Figura 23. Generador Peaktech 4025. 57
Figura 24. Amplificador Crest Audio CA 4 59
Figura 25. Diagrama dimensional del dispositivo. 63
Figura 26. Laminas de vidrio. 66
Figura 27. Lámina acanalada de policarbonato 67
Figura 28. Placa de plexiglass 68
Figura 29. Tuberias de PVC 69
Figura 30. Láminas de fórmica en diferentes calibres. 70
Figura 31. Vista del dispositivo renderizado. 72
Figura 32. Vista lateral del dispositivo renderizado. 73
Figura 33. Vista posterior del dispositivo renderizado. 73
Figura 34. Vista isométrica dispositivo renderizado. 74
Figura 35. Máquina de corte CNC Panel Pro. 75
Figura 36. Fraccionamiento de la placa de plexiglass. 76
Figura 37. Proceso de corte de las caras de la cámara resonante. 77
Figura 38. Corte de tubos de PVC. 77
Figura 39. Acople de tubo PVC a cara lateral de plexiglass. 78
Figura 40. Pegado de la sección de estructura cilíndrica en fórmica. 78
Figura 41. Instalación de tubería de soporte estructural. 79
Figura 42. Ensamble de cámara resonante. 80
Figura 43. Acople de tubería de soporte para la cámara resonante. 80
Figura 44. Ensamble de las secciones mediante tornillos. 81
Figura 45. Acople a presión de tubos guía de onda en PVC. 82
Figura 46. Instalación de los parlantes al dispositivo acústico. 83
Figura 47. Diagrama de flujo de señal. 84

Figura 48. Diagrama de conexionado. 85
Figura 49. Diagrama de medición de voltaje. 89
Figura 50. Diagrama de medición de corriente. 90
Figura 51. Comportamiento de la onda y puntos de ampliación de fuerza 95
Figura 52. Puntos L1x y L1y dentro del dispositivo. 96
Figura 53. Levitación de vaso de poliestireno a 50 Hz 97
Figura 54. Medición a 50 Hz a campo abierto. 98
Figura 55. Medición a 50 Hz respecto al dispositivo. 99
Figura 56. Medición a 580 Hz a campo abierto. 100
Figura 57. Medición a 580 Hz respecto al dispositivo 101

LISTA DE TABLAS

PAG

Tabla 1. Calificación de materiales. 70

Tabla 2. Tabla de características físicas de las muestras. 86

Tabla 3. Tabla de comportamiento de muestras a 580 Hz. 86

Tabla 4. Tabla de comportamiento de muestras a 58 Hz 87

Tabla 5. Tabla de comportamiento de las muestras a 50 Hz. 88

Tabla 6. Medición de voltaje sobre cada eje. 89

Tabla 7. Medición de corriente sobre cada eje. 90

Tabla 8. Cálculo de la potencia sobre cada eje. 91

Tabla 9. Medición a 50 Hz a campo abierto. 99

Tabla 10. Medición a 50 Hz respecto al dispositivo. 100

Tabla 11. Medición a 580 Hz a campo abierto. 101

Tabla 12. Medición a 580 Hz a campo abierto. 102

Tabla 13. Costo de la propuesta. 102

INTRODUCCIÓN

La idea que algo intangible como lo es el sonido pueda levantar objetos puede parecer de no creer, pero es un fenómeno real. La levitación acústica toma ventaja de las propiedades del sonido para causar que los sólidos, líquidos y gases pesados floten. El proceso puede tomar lugar en una gravedad normal o reducida. En otras palabras los objetos pueden levitar en la Tierra o en recintos confinados llenos de gas en el espacio.

El propósito de este proyecto es levitar pequeños objetos usando una onda estacionaria. Para lograr esto una fuente acústica es acoplada a una superficie reflectiva para producir el tipo de onda necesaria. Ajustando la distancia entre la fuente y el reflector, la onda estacionaria producirá varios modos de resonancia, en los cuales la amplitud se incrementa de manera considerable.

Cuando un objeto pequeño es colocado en el espacio entre la fuente y el reflector se dirigirá a una zona de presión en la cual por medio de los nodos de presión de la onda estacionaria este levitará.

Este tipo de enfoque de la física tiene muchas aplicaciones, tales como el procesamiento sin contenedores. Usando la levitación acústica es posible manipular objetos sin tocarlos y posiblemente contaminarlos.

En contraste la muestra también puede ser peligrosa debido a su composición química, factores como este hacen que la manipulación sin contacto sea un proceso óptimo. También se destacan aplicaciones en el espacio en el cual la ausencia de gravedad dificulta el desarrollo de experimentos.

La levitación acústica puede ser usada para confinar equipos en un espacio, evitando que se puedan producir accidentes. Finalmente

puede ser usada para simular ambientes de micro gravedad debido al gran control y estabilidad que esta provee.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 ANTECEDENTES

La acústica es considerada una ciencia nueva a pesar que sus estudios tienen su origen en la Antigua Grecia y Roma, razón por la cual los antecedentes del dispositivo son recientes.

1985, W. Jackson, M. Barmatz y P. Wagner desarrollan un sistema de levitación acústica para levitar un objeto mediante la aplicación de una sola frecuencia por un transductor en una cámara de resonancia que rodea al objeto. La cámara incluye un estabilizador de ubicación a lo largo de su altura, donde las paredes laterales de la cámara convergen en una dirección ascendente. Cuando un patrón de onda estacionaria acústica se aplica entre la parte superior e inferior de la cámara, la superficie de levitación en el estabilizador no se encuentra en un plano horizontal, sino que se curva con la parte más baja, cerca del eje vertical de la cámara. Como resultado, un objeto en levitación acústica es impulsado por gravedad hacia la ubicación más baja en la superficie de levitación, por lo que el objeto se mantiene lejos de las paredes laterales de la cámara[1].

[1] http://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=607767&id=3&as=false&or=false&qs=Ntt%3D%2522Acoustic%2BLevitation%2522%26Ntk%3DTitle%26Ntx%3Dmode%2Bmatchall%26Ns%3DHarvestDate%257c1%26N%3D0

Figura 1. Tubo de Kundt. http://indaga.cl/catalog/images/sw1996-6m.jpg.

1987, el doctor David Deak diseña y construye una cámara de levitación acústica dedicada a estudios de micro gravedad para la NASA; este consistía en un cubo de plexiglás de 12 pulgadas que busca ser una cavidad resonante de Helmholtz usando 3 parlantes incorporados a este.

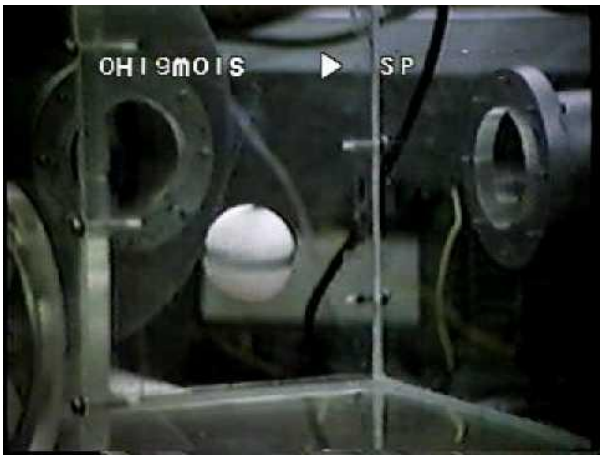


Figura 2. Cámara de levitación acústica de David Deak.
http://i.ytimg.com/vi/94KzmB2bI7s/0.jpg

Aplicando una resonancia continua (600 Hertz) y ajustando la relación de la amplitud y la fase entre las 3 fuentes, se logró controlar la levitación y movimiento en los tres ejes (x,y,z) simulando un ambiente espacial. Esta investigación se usó para mostrar los efectos de las condiciones de micro gravedad que existen en un módulo espacial en órbita en un laboratorio terrestre y estudiar posibilidades para controlar sustancias y grupos de partículas de materiales en estado de ingravidez[2].

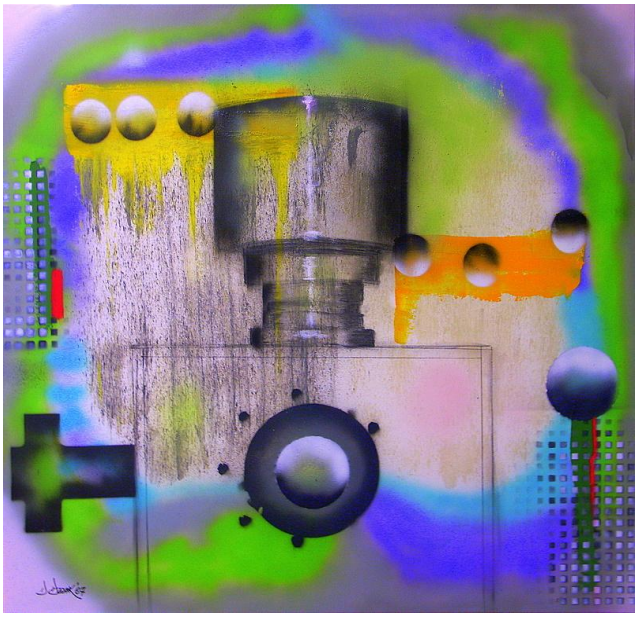


Figura 3. Modelo de cámara de levitación acústica. http://www.saatchi-gallery.co.uk/images/thumbnail1.php/0534d3db.jpg

1992, el físico de materiales Wenjun Xie de la Northwestern Polytechnical University en China usó campos de ultrasonido para levitar gotas de mercurio e iridio, materiales muy pesados. Posteriormente el científico llevo a cabo la levitación de animales vivos de pequeñas proporciones. Xie y sus colegas emplearon un emisor de ultrasonido y un reflector que genera un campo de presión sonora entre esos. El emisor produjo una frecuencia con una longitud de onda de 20 milímetros, teóricamente se podría producir una

[2] www.brooklynartist.com/Resumes/DDCV.doc

levitación de objetos que posean un diámetro de la longitud de onda, lo cual fue suficiente para estudiar los efectos de este estado en hormigas, arañas, mariquitas y peces[3].

Figura 4. Levitación ultrasónica de peces.
http://baratijasblog.com/images/blog/levitating-fish.jpg

1996, El físico M. Stieglmeier construye un levitador ultrasónico para la Agencia Espacial Europea, en este experimento se logra comprobar como este tipo de dispositivos es apropiado para una variedad de experimentos desarrollados bajo gravedad. Otras técnicas han sido derivadas de este estudio, tales como el levitador híbrido. Se comprueba como el levitador simplifica o posibilita investigaciones que hubieran sido más difíciles o inlogrables en presencia de una superficie que haga contacto[4].

1998, Gregory Mc Daniel y Glynn Holt, desarrollan una técnica experimental para el Glenn Research center de la NASA en la que se logra demostrar que acústicamente se pueden levitar gotas de espuma acuosa excitando sus modos esferoidales. Esto permite que los estudios fundamentales de la dinámica de caída de espuma

[3] http://acusticaweb.com/index.php?option=com_content&task=view&id=223&Itemid=79
[4] http://davixu.iespana.es/index.php?m=03&y=07

ofrezcan una vía alternativa para la estimación de las propiedades viscoelásticas Una de las ventajas únicas de la técnica es la falta de interacciones entre la espuma y la superficie que la contiene, que deben tenerse en cuenta en otras técnicas. Los resultados presentan que una gota de espuma con φ fracción del volumen de gas = 0,77 levita a 30 kHz y excitando su resonancia cuadrupolar por primera vez en 63 ± 3 Hz. Al modelar la caída como una esfera elástica, el módulo de corte de la espuma se estimó en 75 ± 3 Pa[5].

2008, GEA Process Engineering (Dinamarca), saca al mercado su Drying Kinetics Analyzer, el cual provee un ambiente libre de contacto por levitación acústica para el análisis de dinámica de fluidos. Una fuente ultrasónica de alto poder (58 KHz) es colocada a 5/2 longitudes de onda sobre un reflector cóncavo para lograr la onda estacionaria. El ambiente que rodea el cono y el reflector puede ser puesto a una temperatura, humedad y velocidad de ventilación deseada[6].

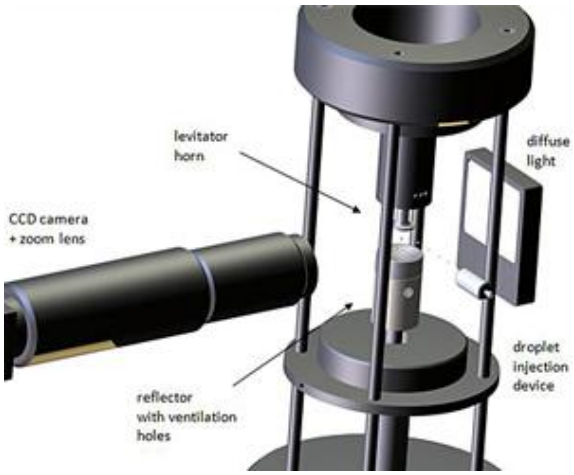


Figura 5. Drying kinetics analyzer.

http://www.geagroup.com/imperia/pb/Kunden/Produktnews/produktnews1a.jpg

5

http://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=110358&id=1&as=false&or=false&qs=Ntt%3D%2522Acoustic%2BLevitation%2522%26Ntk%3DTitle%26Ntx%3Dmode%2Bmatchall%26Ns%3DHarvestDate%257c1%26N%3D0

6 http://www.niro.com/niro/cmsdoc.nsf/WebDoc/ndkw7bqjun

En nuestro país y en los proyectos adelantados en la universidad de San Buenaventura no se ha producido ninguna investigación conocida en este campo.

1.2 DESCRIPCIÓN Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

La levitación acústica es un método empleado para la suspensión de sustancias en un fluido mediante el empleo de la presión de la radiación acústica procedente de ondas de sonido intensas. Algunos métodos pueden hacer levitar objetos sin crear sonido audible para el oído humano.

Esta es empleada generalmente en procesos en los que se requieran materiales de pureza muy elevada o reacciones químicas muy rigurosas para realizarse dentro de contenedores.

Algunos materiales son corrosivos o por otra parte pueden reaccionar con contenedores ordinarios usados comúnmente durante los análisis químicos. Al ser sometidos a un campo acústico para generar su suspensión, es posible estudiar dichos materiales sin riesgo de contaminación o alteración de la naturaleza química de las muestras.

¿Cómo lograr la construcción de un dispositivo de levitación acústica que permita el movimiento de una muestra en al menos una dimensión?

1.3 JUSTIFICACIÓN

Los campos de aplicación de la Ingeniería de Sonido son muchos y muy distintos; uno de los menos explotados es la investigación y producción de nuevas herramientas acústicas. En la constante búsqueda de mejores y diferentes maneras de lograr integrar este campo de la ciencia con sus similares es importante ver de qué formas se puede contribuir a estas con tecnología novedosa y eficaz que pueda facilitar los avances científicos.

Estos estudios contribuyen en distintos campos, tales como:

- La manufactura de dispositivos electrónicos de un tamaño muy reducido y microchips a menudo involucra el uso de robots y maquinaria muy compleja, este mismo resultado puede ser logrado por levitación. Por ejemplo en la levitación de materiales fundidos estos gradualmente se enfriarán y solidificarán y en un campo sonoro el sólido resultante es una esfera perfecta. Similarmente, un campo correctamente formado puede inducir a los plásticos a depositar y reforzar sólo las áreas correctas de un microchip.

- El estudio de espumas acústicas se ha visto obstaculizado por la gravedad, la cual ejerce una fuerza sobre el líquido hacia debajo de la espuma, secándola y destruyéndola. Los investigadores pueden contener esta dentro de un campo acústico que permita estudiarla en este espacio sin la interferencia gravitatoria. Esto puede llevar a un mejor entendimiento de cómo la espuma desarrolla tareas como limpiar el agua del océano.

- Debido a la dificultad de la manipulación y posicionamiento de muestras para una tomografía de rayos x con una fuente de luz definida, la posibilidad de empleo de un levitador acústico puede resolver los problemas.

1.4 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACION

1.4.1 OBJETIVO GENERAL

Construir un levitador acústico, mediante el principio de onda estacionaria, aplicado al transporte sin contacto.

1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar las características de los sistemas de transporte sin contacto basados en LACP (levitación acústica en campo próximo).
- Delimitar las características de las muestras sometidas al campo sonoro para ser levitadas.
- Definir las especificaciones técnicas necesarias tales como potencia, frecuencia de operación, amplitud.
- Diseñar y construir el prototipo que cumpla con las condiciones propuestas.

1.5 ALCANCES Y LIMITACIONES DEL PROYECTO

El proyecto está dirigido a la creación de un prototipo capaz de levitar una muestra de material. El material objeto de la levitación se encuentra limitado principalmente en cuanto a su masa, pues al ser aplicada potencia acústica no es posible crear la fuerza suficiente para afectar positivamente más que algunos gramos de un material.

Así mismo, es importante señalar que para fines experimentales y demostrativos se procurará el uso de materiales de fácil adquisición y estabilidad química para de esta manera no poner en riesgo el

dispositivo experimental. Por otra parte, se preferirán materiales sólidos dado que proporcionan una manipulación más efectiva.

Para la construcción final del dispositivo se deberá hacer uso de algunos equipos disponibles en los laboratorios de la universidad, tales como amplificadores y generadores de onda que, aunque no hacen parte directa del dispositivo y su diseño, son necesarios para su operación.

Logrando esto se habrá logrado la correcta integración de conceptos que comprenden la LACP (levitación acústica en campo próximo), con esto se puede lograr una base para este tipo de estudios y desarrollo de nuevas herramientas a nivel nacional. Es un desarrollo tecnológico que puede tener repercusiones en ámbitos tan distintos como el del cuidado del medio ambiente gracias a la posible aplicación del concepto de luminiscencia.

El proyecto está planteado para la levitación de muestras de pequeños sólidos, de esta forma, el proyecto se limitará al análisis del comportamiento de la muestra dentro del contenedor en el cual deberá levitar de acuerdo al cálculo del dispositivo, sin importar que tenga un comportamiento negativo dentro del mismo.

2 MARCO DE REFERENCIA

2.1 MARCO CONCEPTUAL

2.1.1 FRECUENCIA

Frecuencia es una medida que se utiliza generalmente para indicar el número de repeticiones de cualquier fenómeno o suceso periódico en la unidad de tiempo.

Para calcular la frecuencia de un suceso. Según el SI (Sistema Internacional), la frecuencia se mide en hercios (Hz), en honor a Heinrich Rudolf Hertz. Un hercio es aquel suceso o fenómeno repetido una vez por segundo. Así, dos hercios son dos sucesos (períodos) por segundo, etc. Esta unidad se llamó originariamente «ciclo por segundo» (cps) y aún se sigue utilizando. Otras unidades para indicar la frecuencia son revoluciones por minuto (rpm) y radianes por segundo (rad/s). Las pulsaciones del corazón y el *tempo* musical se mide en «pulsos por minuto» (bpm, del inglés *beats per minute*)[7].

La frecuencia tiene una relación inversa con el concepto de longitud de onda (ver gráfico), a mayor frecuencia menor longitud de onda y viceversa. La frecuencia *f* es igual a la velocidad *v* de la onda, dividido por la longitud de onda λ (lambda):

$$f = \frac{v}{\lambda} \tag{2.1}$$

Cuando las ondas viajan de un medio a otro, como por ejemplo de aire a agua, la frecuencia de la onda se mantiene constante, cambiando sólo su longitud de onda y la velocidad.

[7] http://es.wikipedia.org/wiki/Frecuencia

Por el efecto Doppler, la frecuencia es una magnitud invariable en el universo. Es decir, no se puede modificar por ningún proceso físico excepto por su velocidad de propagación o longitud de onda.

2.1.2 ONDA ESTACIONARIA

Una onda estacionaria es el resultado de la superposición de dos movimientos ondulatorios armónicos de igual amplitud y frecuencia que se propagan en sentidos opuestos a través de un medio. Pero la onda estacionaria no es una onda viajera, puesto que su ecuación no contiene ningún término de la forma $kx-\omega t$[8].

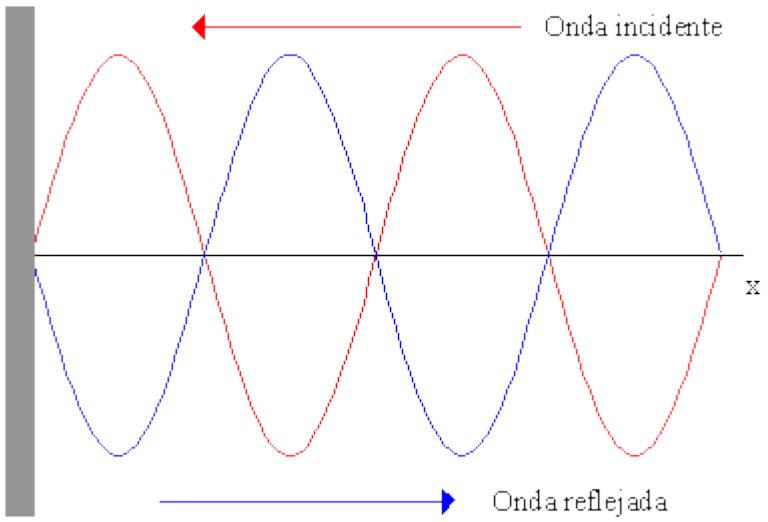


Figura 6. Gráfica de onda estacionaria.

En una onda estacionaria se distinguen los puntos nodales (o simplemente nodos), que son aquellos puntos en que la amplitud es

[8] http://www.uclm.es/profesorado/ajbarbero/Practicas/Ondas%20estacionarias06.pdf

nula, es decir, posiciones donde no hay vibración; los vientres o antinodos de la onda estacionaria, por el contrario, son los puntos en donde la vibración se produce con la máxima amplitud posible.

La distancia entre dos nodos consecutivos es igual a media longitud de onda.

2.1.3 LONGITUD DE ONDA

La longitud de una onda es la distancia que recorre la onda en el intervalo de tiempo transcurrido entre dos máximos consecutivos de una de sus propiedades. En otras palabras, describe lo larga que es la onda. Las ondas de agua en el océano, las ondas de aire, y las ondas de radiación electromagnética tienen sus correspondientes longitudes de onda.

La longitud de onda es una distancia real recorrida por la onda (que no es necesariamente la distancia recorrida por las partículas o el medio que propaga la onda, como en el caso de las olas del mar, en las que la onda avanza horizontalmente y las partículas se mueven verticalmente). La letra griega **λ** (lambda) se utiliza para representar la longitud de onda en ecuaciones. La longitud de onda es inversamente proporcional a la frecuencia de la onda. Una longitud de onda larga corresponde a una frecuencia baja, mientras que una longitud de onda corta corresponde a una frecuencia alta.

La longitud de onda de las ondas de sonido, en el intervalo que los seres humanos pueden escuchar, oscila entre menos de 2 cm y aproximadamente 17 metros. Las ondas de radiación electromagnética que forman la luz visible tienen longitudes de onda entre 400 nanómetros (luz violeta) y 700 nanómetros (luz roja).

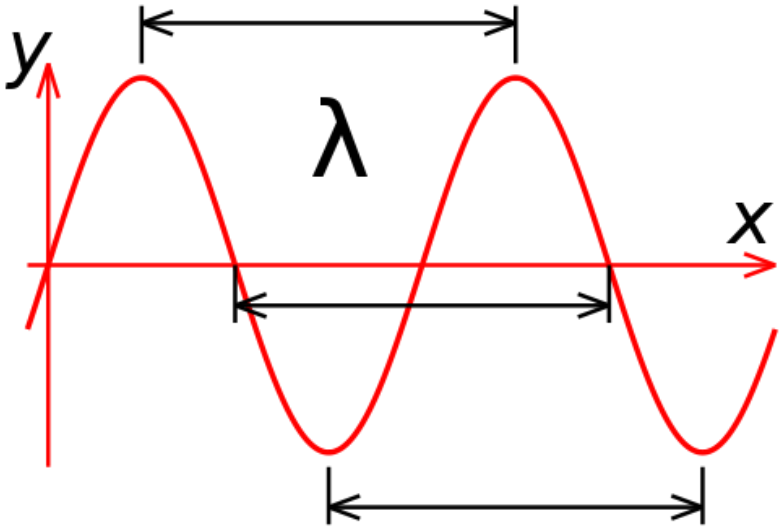


Figura 7. Longitud de onda de una señal senosoidal.

La longitud de onda λ es inversamente proporcional a la frecuencia f, siendo ésta la frecuencia del movimiento armónico simple de cada una de las partículas del medio. (La longitud de onda no se debe confundir con la frecuencia angular ω)[9].

$$\lambda = \frac{v}{f} \tag{2.2}$$

2.2 MARCO TEÓRICO

2.2.1 LEVITACIÓN:

Un cuerpo levita cuando se mantiene en flotación sin ningún soporte material aparente. En este caso, la fuerza anti-gravitatoria es una fuerza repulsiva que impide el contacto entre dos cuerpos, Para lograr un fenómeno efectivo de levitación sobre un cuerpo será

[9] http://es.wikipedia.org/wiki/Longitud_de_onda

necesario entonces colocarlo sobre el otro cuerpo y compensar la fuerza de gravedad.

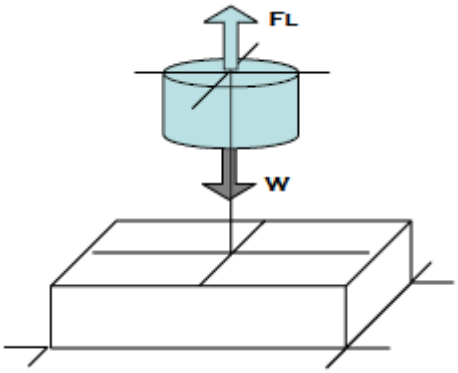


Figura 8. Diagrama de neutralización de fuerza gravitatoria.

Existen diferentes métodos que permiten compensar las fuerzas gravitatorias para generar el fenómeno de levitación:

- Óptico
- Electrostático
- Magnético
- Aerodinámico
- Acústico

2.2.1.1 LEVITACIÓN ÓPTICA:

En la levitación óptica se emplean láseres para elevar objetos de poca masa mediante su presión de radiación. El material logra levitar mediante una fuerza creada por la transferencia de momentos fotónicos usando el principio de conservación del momento[10].

2.2.1.2 LEVITACIÓN ELECTROSTÁTICA:

El fenómeno de levitación electrostática se vale de un cuerpo cargado eléctricamente para que, a través de un campo eléctrico, este sea capaz de neutralizar la fuerza gravitatoria.

De acuerdo al teorema de Earnshaw, no es posible lograr una configuración ideal en la que los dos campos se cancelen, pues este punto es inestable y debe ser regulado mediante la acción de campos eléctricos dinámicos para mantener la posición del objeto[11].

[10] D. van Nostrand, *Van Nostrand's Scientific Encyclopedia* (3ª Edición), D. Van Nostrand, Princeton, New Jersey, 1958

[11] Samuel Earnshaw, "On the Nature of the Molecular Forces which Regulate the Constitution of the Luminiferous Ether," *Trans. Camb. Phil. Soc.*, V7, pags. 97-112 (1842)

2.2.1.3 LEVITACIÓN MAGNÉTICA:

En este caso la levitación de objetos es posible gracias a que las fuerzas magnéticas se transmiten sin necesidad de un medio material y al contrarrestar la gravedad pueden llegar a suspender objetos. El principio elemental consiste en la confrontación de parejas de imanes enfrentando los polos del mismo signo y generando fuerzas de repulsión.

Figura 9. Dispositivo de levitación diamagnética.

http://www.3bscientific.es/imagelibrary/U45051_L

2.2.1.4 LEVITACIÓN AERODINÁMICA:

La levitación aerodinámica es posible mediante las variaciones de presión de determinados gases para mantener un objeto en una posición estable sin contacto físico aparente. Este tipo de levitación

es la que permite el vuelo de los helicópteros, ya que mediante la variación de velocidad de la hélice genera a su vez cambios de presión del aire entre sus partes superior e inferior, permitiendo el impulso en contra de la fuerza de gravedad.

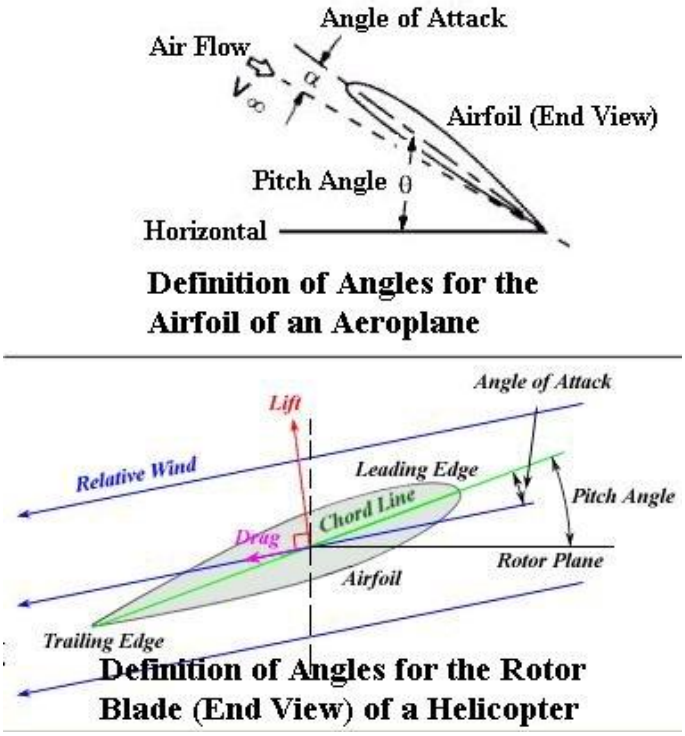


Figura 10. Configuraciones de hélice de acuerdo a flujos de aire.

http://universe-review.ca/I13-24-angles.jpg

2.2.1.5 LEVITACIÓN ACÚSTICA:

En este tipo de levitación inducida se tiene en cuenta fundamentalmente la presión de radiación acústica proveniente de ondas sonoras.

Este método es empleado principalmente para análisis de materiales que requieren una pureza muy elevada o para la realización de reacciones químicas que podrían llegar a ser muy peligrosas si entraran en contacto con su contenedor.

En esencia, un levitador acústico consta de dos componentes básicos; una fuente y un reflector. El principio de su funcionamiento es que una fuente irradia una onda sonora determinada y esta rebota contra la superficie bajo el principio de reflexión, que establece que el ángulo de incidencia de la onda sonora será igual al ángulo de reflexión[12].

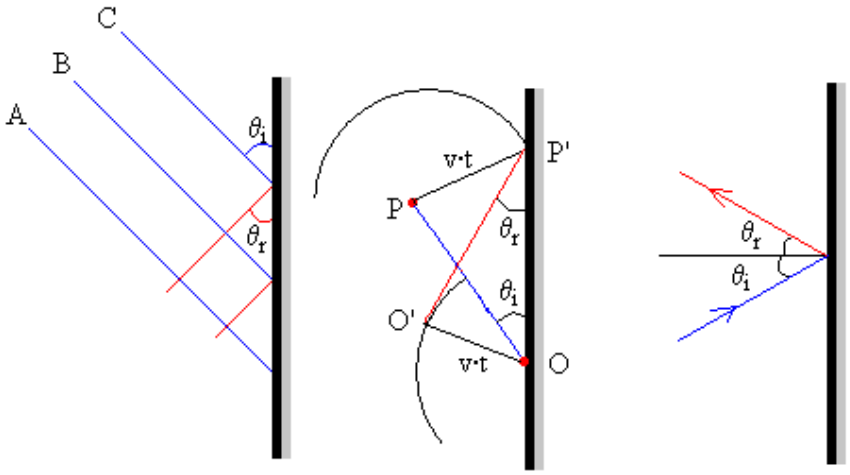


Figura 11. Ley de la reflexión de ondas.

http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/ondas/snell/snell.htm

Si el ángulo incidente formado por la onda sonora y la superficie reflectiva es de 90º, el camino que recorre la onda reflectada será el mismo que la incidente, lo que permite la interferencia entre los puntos de máxima y mínima presión que al combinarse generan una onda estacionaria. Las ondas estacionarias son ondas que vibran

[12] http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/ondas/snell/snell.htm

pero no viajan, es decir, son modos de vibración compuestos por nodos (áreas de mínima presión) y antinodos (áreas de máxima presión)[13].

Cuando la orientación de la onda es paralela a la fuerza debido a la aceleración de la gravedad, partes de la onda tienen presión descendente constante y otras partes tienen presión ascendente. En los nodos no existe mayor nivel de presión, por lo que las partículas en flotación se acumulan en cercanías a dicho punto.

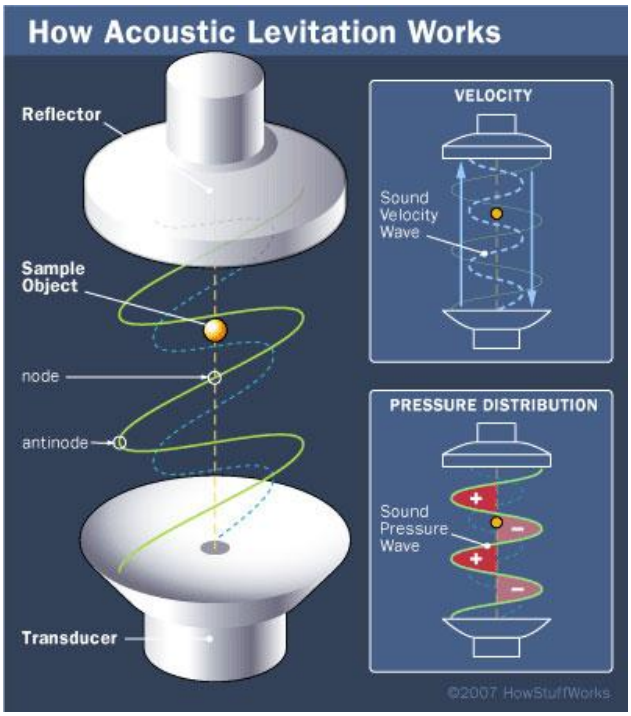


Figura 12. Principio de levitación acústica.
http://100musicalfootsteps.files.wordpress.com/2008/01/acoustic-levitation-21.jpg

Las ondas estacionarias comunes pueden llegar a ser relativamente poderosas. Por ejemplo, una onda estacionaria en un ducto de aire puede causar que el polvo se disperse en un patrón correspondiente a los nodos de esta onda. Una onda estacionaria reverberante puede causar que los objetos en su camino entren en vibración.

[13] KANE, Joseph W y STERNHEIM, Morton M. "*Physics*". 2004. Pg 493.

Normalmente las ondas estacionarias están limitadas por su naturaleza lineal. Aumentar la amplitud de la onda causa que el sonido tenga mayor intensidad, pero esto no afecta la forma de onda o causa un cambio físico más notorio.

Sonidos extremadamente intensos son usualmente no lineales. Estos pueden causar respuestas de medida desproporcionada en las sustancias por las cuales se desplaza.

Los efectos no lineales pueden combinarse para producir la fuerza necesaria de un sonido intenso, esto debido a que los efectos de la radiación de la presión acústica puede tornarse lo suficientemente poderosa como para lograr un balance con su inversa gravitatoria[14].

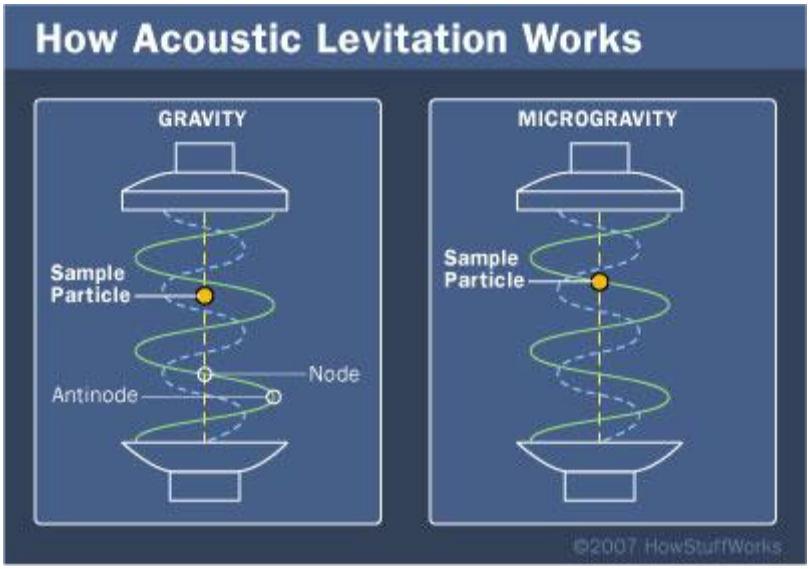


Figura 13. Sonido No lineal y Levitación Acústica

http://www.instructables.com/files/deriv/FZP/NXTI/FEL1NIY7/FZPNXTIFEL1NIY7.MEDIUM.jpg

Otro aspecto de gran importancia es el uso de la frecuencia correcta para la creación de la onda estacionaria. Cualquier frecuencia puede

[14] http://science.howstuffworks.com/acoustic-levitation2.htm

producir efectos no lineales a una amplitud correcta, pero la mayoría de los sistemas usan ondas ultrasónicas, las cuales son demasiado altas en frecuencia como para ser percibidas por el oído humano. También deben ser considerados otros factores:

- La distancia entre el transductor y el reflector debe ser un múltiplo de la mitad de onda correspondiente a la frecuencia generada. Esto produce una onda con nodos y antinodos estables. Algunas ondas pueden producir gran cantidad de nodos útiles, pero los más cercanos al transductor y al reflector usualmente no son apropiados para levitar objetos. Esto es debido a que las ondas crean una zona de presión cercana a las superficies reflectivas.

- En un ambiente de micro gravedad, como el espacio, las áreas estables dentro de los nodos deben ser de igual manera de las proporciones necesarias. Por esta razón el objeto a ser levitado debe medir entre un tercio y la mitad de la longitud de onda del sonido. Los objetos de un tamaño superior a dos tercios de la longitud de onda son demasiado grandes para ser levitados, el campo no es lo suficientemente amplio como para soportarlo. Entre mayor sea la frecuencia menor será el diámetro de los objetos posibles a levitar.

- Objetos del tamaño correcto deben poseer también la masa correcta. Esto se logra evaluando la densidad del objeto y determinando si se puede producir la presión necesaria.

- Las muestras líquidas deben tener un “Bond number” adecuado, este es el radio que describe la tensión superficial del líquido, densidad y tamaño en el contexto de la gravedad y el fluido circundante. Si el número Bond es demasiado bajo, la gota se reventará.

- La intensidad sonora no debe sobrepasar la tensión superficial de las gotas (en muestras líquidas) que están siendo levitadas. Si el campo sonoro es demasiado intenso, la gota se deformará y estallará.

A finales de los 60´s las ventajas potenciales del procesamiento sin contenedores en el espacio fueron reconocidas y desde entonces la NASA ha apoyado el desarrollo de dos tipos de técnicas de posicionamiento acústico.

- Método de resonancia en tres ejes: este método posiciona una muestra usando la superposición de tres ondas planas con modos resonantes en una cámara rectangular.
- Método de interferencia en un eje: en esta técnica, una muestra es posicionada usando el patrón de interferencia de una onda siendo emitida y reflectada, estas son originadas de una fuente y un reflector, respectivamente.

2.2.2 CARACTERÍSTICAS DE LOS SISTEMAS DE LEVITACIÓN ACÚSTICA EN CAMPO PRÓXIMO

En el desarrollo de levitadores acústicos para el procesamiento de materiales son usadas las siguientes formulaciones teóricas.

- Magnitud de las fuerzas incidentes
- Dimensiones óptimas a fin de maximizar las fuerzas restauradoras
- Dependencia de la temperatura de las fuerzas restauradoras
- Estabilidad traslacional y rotacional de la muestra
-

La radiación total potencial U de un sistema acústico en gravedad es la suma del potencial acústico U_a y el potencial gravitacional U_g:

$$U = U_a + U_g$$

(2.3)

Donde:

$$U_g = (m_s - m_f)gh = F_g h$$

(2.4)

Y m_s es la masa de la muestra, m_f es la masa del fluido y F_g es la fuerza gravitacional.

En todos los casos, la función h depende de las coordenadas geométricas y los ángulos que especifican la orientación de la cámara.

Los componentes totales de la fuerza son obtenidos del gradiente de potencial

$$F = -gradU$$

(2.5)

Se tiene que:

$$F_i = F_{ai} + F_{gi}$$

(2.6)

Donde F_{ai} son los componentes acústicos de fuerza, $F_{gi} = F_g w_i$ son los términos gravitacionales proyectados, y F_i son los componentes de fuerza

resultantes totales. El subíndice $_i$ representa las coordenadas (x,y,z), (r,θ,ϕ) y (r,ϕ,z) en los casos rectangular, esférico y cilíndrico, respectivamente. Las proyecciones de funciones gravitacionales que dependen de las coordenadas angulares y los angulos de orientación están dadas por $w_i = \partial h / \partial x_i$.

2.2.2.1 FUERZA ACÚSTICA REQUERIDA

Cualitativamente, la fuerza de red en un objeto sujeto a un campo acústico surge de las relaciones no lineales entre la presión instantánea y la velocidad en un medio acústico. Bajo ciertas condiciones, esta no linealidad puede producir gradientes de presión significativos sobre la superficie de un objeto, resultando en una fuerza de red sobre este. Como resultado, un campo acústico lo suficientemente fuerte puede suspender un objeto contra la fuerza de gravedad.

La fuerza de red acústica en una esfera rígida colocada en una onda estacionaria es determinada integrando la desviación de presión promediada en el tiempo debido al campo acústico sobre la superficie total de la esfera.

King en 1934 plantea que para esferas pequeñas, comparadas con la longitud de onda, este producto es resultante de la forma[15]:

$$\overline{F} \approx (5/3)\pi(\overline{E}/k^2)(ka)^3 sen(2kh) \qquad (2.7)$$

Donde $\overline{F}$ representa la fuerza promedio en el tiempo en la esfera, $\overline{E}$ es la densidad de energía promediada en el tiempo del campo acústico, *k* es el número de onda acústico (k=2 π/λ), *h* es la distancia entre el plano modal de la onda estacionaria y el centro de la esfera, y *a* es el radio de la esfera.

[15] C. Shipley (1989), *Acoustic levitation in the presence of gravity*, California Institute of Technology.

Se destaca como la fuerza de red varía de manera senosoidal con *h*, la distancia entre el centro del objeto y el plano modal de la onda estacionaria. Hay dos puntos dentro de cada longitud de onda en los cuales la fuerza es ampliada, correspondientes a $kh = \pi/4$ y $kh = 3\pi/4$. Para esferas pequeñas, la fuerza varía a nivel del cubo del radio. Esto indica que pequeñas esferas homogéneas que posean la misma densidad será acelerada igualmente bajo la influencia del campo acústico.

Lupi en 1989 formuló el mínimo de energía acústico requerido para la levitación contra la gravedad, que es independiente del tamaño de la esfera, y se expresa:

$$\overline{E}_{\min} \approx (4\rho_1 g/5k) \tag{2.8}$$

Donde ρ_1 es la densidad de la esfera y *g* es la aceleración debida a la gravedad.

2.2.2.2 FUERZAS INCIDENTES

Para formular el potencial acústico y las fuerzas incidentes de las ondas estacionarias en resonadores rectangulares, cilíndricos y esféricos es usado el método de Gor'kov[16]. Este formula la siguiente expresión para el potencial promedio en el tiempo, U, de la fuerza acústica F que actúa en una pequeña partícula esférica en un campo acústico arbitrario en un fluido ideal.

$$U = 2\pi R^3 \left(\frac{< p^2 >}{3\rho c^2} - \rho \frac{< v^2 >}{2} \right) \tag{2.9}$$

[16] [16] Barmatz, M “A new method for acoustic containerless processing of materials”; M. Jet Propulsion Laboratory; California Institute of Technology

Donde: p^2 y v^2 son las fluctuaciones promedio del cuadrado de la presión y del cuadrado de la velocidad incidente en la onda, en el punto donde la partícula de radio *R* está localizada.

Cuando incorporamos las diferencias de compresibilidad y densidad entre la muestra y el medio que la rodea tomamos los factores f_1 y f_2 para cada una de estas:

$$f_1 = 1 - \rho c^2 / \rho_s c_s^2$$
$$f_2 = 2(\rho_s - \rho)/(2\rho_s + \rho)$$

(2.10)

Donde: c es la velocidad del sonido en el fluido, cs es la velocidad del sonido en la partícula, ρ es la densidad del fluido y ρs es la densidad del fluido en la partícula.

Cuando los incorporamos en *U:*

$$U = 2\pi R^3 \{(\bar{p}_{in}^2 / 3\rho c^2) f_1 - (\rho \bar{v}_{in}^2 / 2) f_2\}$$

(2.11)

Los rangos permisibles de los factores *f*1 y *f*2 son: $-\infty \leq f1 \leq 1$ y $-2 \leq f2 \leq 1$.

En el caso de una esfera rígida $f1 = f2 = 1$.

Los componentes de la fuerza acústica son obtenidos del potencial usando la expresión:

$$F = - grad\ U$$

(2.12)

Para comparación, se definen las siguientes expresiones de presión acústica, componentes de fuerza y presión:

$$\tilde{U} = U/(uR^3 \rho v_0^2)$$

(2.13)

$$\tilde{F}_l = F_l/(uR^3 p v_0^2 k)$$

(2.14)

$$\tilde{p} = p_{in}/\rho c v_0$$

(2.15)

Donde v_0 es la velocidad máxima de la partícula y k es el número de onda del sonido.

Para un modo dado, las posiciones de localización estable corresponden al mínimo aislado del potencial $\tilde{U}$. Los puntos críticos del potencial son obtenidos requiriendo:

$$\partial \tilde{U} / \partial \tilde{x}_i = 0$$

(2.16)

O su equivalente $\tilde{F}_i = 0$, donde $\tilde{x}_i = kx_i$ para coordenadas dimensionadas x_i. Para aplicaciones prácticas de posicionamiento acústico es importante conocer el grado de estabilidad dado por un potencial acústico. Cuando fuerzas externas aleatorias se manifiestan la muestra puede alejarse del potencial mínimo. Si la fuerza externa es pequeña, el grado de estabilidad de la muestra dependerá de la fuerza acústica restauradora cercana al

potencial mínimo. En general el potencial emanado no es simétrico, y habrá direcciones características que corresponden a las fuerzas restauradoras más débiles. La fuerza restauradora máxima $F_{0\max}$ al lado de cualquier dirección particular ocurre en la inflexión de puntos entre el potencial máximo y mínimo.

$$MSF = \frac{1}{T}\sum_{t_j=1}^{T}(x_i(t_j) - \tilde{x}_i)^2$$

(2.17)

2.2.2.3 ONDA ESTACIONARIA GENERADA

Como resultado de múltiples reflexiones entre una fuente sonora y un reflector sólido, ya sea plano o cóncavo, el cual es ajustado concéntricamente a una distancia de longitudes de onda en múltiplos, de la presión sonora y la amplitud de la velocidad será generada una onda estacionaria con nodos y antinodos espaciados equivalentemente.

Las muestras sólidas o líquidas con diámetros de menos de la mitad de la longitud de onda serán levitados sin contacto bajo los nodos de presión como resultado de la radiación de la presión axial y radial de Bernoulli. El teorema afirma que la energía total de un sistema de fluidos con flujo uniforme permanece constante a lo largo de la trayectoria de flujo.

Los requerimientos de presión acústicos se ven reducidos considerablemente cuando la longitud de onda es superior a tres veces el diámetro de la muestra.

Los perfiles axiales de la presión acústica y la velocidad de la amplitud de las partículas sonoras (promedio de tiempo) para una onda estacionaria:

$$\hat{p} = \hat{p}_{\max} \cdot \cos kz$$
$$\hat{v} = \hat{v}_{\max} \cdot sen kz$$

(2.18)

Con los nodos y antinodos resultantes de los respectivos perfiles de las densidades de la energía potencial y cinética:

$$\overline{E}_{pot} = \frac{\hat{p}^2_{\max}}{2\rho_0 c_0^2} \cos^2 kz$$

$$\overline{E}_{kin} = \frac{\rho_0 \hat{v}^2{}_{\max}}{2} \sin^2 kz$$

(2.19)

Donde k representa el número de onda:

$$k = 2\pi / \lambda$$

(2.20)

2.2.2.4 FUERZA DE LEVITACION AXIAL

Estas densidades de energía proveen una distribución de energía alrededor de la muestra la cual después de la integración sobre la superficie de la muestra, resulta en una fuerza de levitación acústica axial.

$$F_{ac} = c_{w,ac} \cdot \frac{\rho_0}{2} \cdot \hat{v}^2_{\max} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d_s^2 = \frac{\pi}{6} \cdot d_s^3 \cdot \rho_s \cdot g$$

(2.21)

Esta levitación compensa el peso de la muestra $\rho_s V_s g$ en el campo gravitacional. Bajo condiciones de microgravedad ($g \approx 0 m/s^2$), la muestra se posicionará establemente exactamente en el nodo de presión, mientras, bajo condiciones terrestres su peso será compensado con un desplazamiento hacia abajo del centro de la muestra bajo el nodo de presión.

En las frecuencias ultrasónicas las ondas estacionarias no son perfectamente planas, pero muestran una pequeña divergencia, un perfil radial de la velocidad de la partícula sonora existe.

Este es un resultado de una fuerza radial simétrica la cual está centrando la muestra levitada en el eje del levitador.

2.2.2.5 NODOS DE PRESIÓN

En un levitar ultrasónico, existen de 4 a 5 nodos los cuales pueden ser visualizados al atomizar una gota de agua de manera frontal al levitador. La muestra atomizada se dirigirá a los nodos de presión. Sólo de 2 a 3 nodos interiores, nodos de presión, pueden ser usados para una levitación estable.

Los otros dos nodos externos se encuentran influenciados por efectos desestabilizadores de la fuente y el reflector[17]

En el caso de una cámara, la cantidad de nodos de presión será menor puesto que se generan ondas de más baja frecuencia, lo que aumenta la longitud de onda y por ende las distancias entre los nodos de la onda estacionaria.

En una cámara de largo (L) se experimentarán máximos de levitación acústica en los nodos de presión, así:

[17] Barmatz, M “A new method for acoustic containerless processing of materials”; M. Jet Propulsion Laboratory; California Institute of Technology

$$L = \lambda/8$$

$$L = 3\lambda/8$$

$$L = 5\lambda/8$$

(2.22)

2.2.3 GEOMETRÍA RECTANGULAR

La distribución de una onda estacionaria en una cámara depende de múltiples factores, como la geometría de esta, las propiedades físicas del medio y la excitación del recinto.

Para este tipo de geometría las funciones de proyección gravitacional w_i son simplemente direcciones de los cosenos, así

$$w_x = \lambda = \cos\alpha,$$

(2.23)

$$w_y = \mu = \cos\beta,$$

(2.24)

$$w_z = \nu = \cos\gamma$$

(2.25)

Dónde:

$$\lambda^2 + \mu^2 + \nu^2 = 1.$$

(2.26)

El potencial normalizado pasa a ser:

$$\tilde{U} = \tilde{U}_a - \tilde{F}_g k(\lambda x + \mu y + \nu z)$$

(2.27)

donde $\tilde{U}_a$ está dado por:

$$\tilde{U}_a = \frac{f_1}{3}\cos^2 k_x x \cos^2 k_y y \cos^2 k_z z - \frac{f_2}{2}$$
$$\left[(\frac{k_x}{k})^2 sen^2 k_x x \times \cos^2 k_y y \cos^2 k_z z + (\frac{k_y}{k})^2 \cos^2 k_x x sen^2 k_y y \times \cos^2 k_z z + (\frac{k_z}{k})\cos^2 k_x x \cos^2 k_y y \times sen^2 k_z\right.$$

(2.28)

Los factores f_1 y f_2 están dados por:

$$f_1 = 1 - \rho_f c^2 / \rho_s c_s^2$$

(2.29)

$$f_2 = 2(\rho_s - \rho_f)/(2\rho_s + \rho_f)$$

(2.30)

Donde c es la velocidad del sonido en la muestra esférica. El término $\tilde{F}_g k(\lambda x + \mu y + \nu z)$ se desprecia en un plano que es perpendicular a F_g y pasa a través del origen.

Los componentes de fuerza están dados por:

$$\tilde{F}_i = \tilde{F}_{ai} + \tilde{F}_g w_i$$

(2.31)

$$\tilde{F}_{ax} = \left(\frac{k_x}{k}\right) sen 2k_x x \left\{ \left[\frac{f_1}{3} + \left(\frac{f_2}{2}\right)\left(\frac{k_x}{k}\right)^2 \right] \cos^2 k_y y \times \cos^2 k_z z - \left(\frac{f_2}{2}\right) \left[\left(\frac{k_y}{k}\right)^2 sen^2 k_y y \cos^2 k_z z + \left(\frac{k_z}{k}\right) \cos^2 k_y y sen^2 k_z z \right] \right\}$$

(2.32)

Donde

$$w = w_i e_i = \lambda e_x + \mu e_y + \nu e_z$$

(2.33)

Para obtener $\tilde{F}_{ay}$ y $\tilde{F}_{az}$, se intercambian $x \leftrightarrow y$ y $x \leftrightarrow z$ respectivamente.

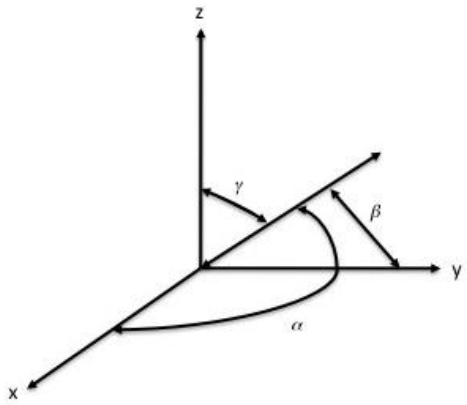


Figura 14. Orientación de la gravedad en una geometría rectangular; α, β, y γ, son los ángulos que el vector gravitacional forma con los ejes x, y, z.

2.2.4 NIVEL DE POTENCIA ACÚSTICA (Lw)

Parámetro que mide la forma en que es percibida la potencia acústica, en donde W_1 es la potencia a estudiar, y W_0 es la potencia umbral de audición, que expresada en unidades del SI, equivale a 10^{-12} vatios o 1 pW, y que se toma como referencia fija.

$$Lw = 10 \cdot \log \frac{w_1}{w_0}$$

(2.34)

2.2.5 NIVEL DE PRESIÓN ACÚSTICA (Lp)

Existe una relación entre el nivel de presión acústica y el nivel de potencia acústica:

$$Lp = Lw - 20 \log r - 11 (dB)$$

(2.35)

donde, Lw es el nivel de potencia acústica y r es la distancia a la fuente emisora de sonido.

2.2.6 SENSIBILIDAD

Para un parlante común, la fracción de la potenciatotal que realmente se convierte en sonido es muy pequeña (del orden de un 2 a 3 %). Para una bocina, suele ser de un 10 a 15%. Esto es porque los parlantes son

transductores energéticamente muy ineficientes (desperdician mucha energía en forma de calor).

Los fabricantes ofrecen un parámetro del parlante denominado *sensibilidad*. Se define como el nivel de presión sonora *Lp*(*do,Wo*) que es capaz de producir con una potencia *eléctrica Wo* = 1 W de y a una distancia *do* = 1 m del centro del parlante[18].

La siguiente ecuación permite calcular el nivel de presión sonora a una distancia *d* cualquiera cuando se alimenta el parlante con una potencia eléctrica *We*.

$$Lp\ (d, We) = \ Lp\ (do, Wo) + 10Log\frac{We}{Wo} + 10Log\left(\frac{do^2}{d^2} + \ 16\pi * \frac{1-\alpha}{\alpha S}\right) \quad (2.36)$$

Donde

α = Coeficiente de absorción del material.

S= Superficie del material.

2.2.7 RESONADOR DE HELMHOLTZ

Para lograr un sistema que trabaje en su totalidad sintonizado a una misma frecuencia se plantea el uso de un resonador de Helmholtz, el cual también provee ventajas en el manejo de la presión sonora. Este dispositivo es un caso importante de propagación por medio de guía de onda, cuando una fuente radia hacia un fluido contenido entre dos planos horizontales (análisis de modos).

Al usar un altavoz montado en una cabina cerrada, el sistema combinado puede ser analizado como un resonador de Helmholtz, en el cual tanto la reactancia del aire y la masa del cono del altavoz contribuyen a la rigidez

[18] http://www.soundlogics.com/PARLANTE%20O%20ALTAVOZ.html

efectiva. Además, en resonancia, el resonador actúa como un amplificador de la ganancia.

Al excitar la masa de aire en el interior de una botella, puede obtenerse una nota musical. Este fenómeno ocurre en botellas de forma arbitraria y corresponde a una oscilación forzada diferente a la que presenta un simple tubo, se trata en este caso de un *resonador de Helmholtz*. En estos dispositivos, la oscilación del aire que se encuentra en el cuello de la botella provoca la compresión y descompresión del aire del cuerpo. Si las dimensiones del resonador son pequeñas comparadas con la longitud de onda del sonido, el gradiente de presión en el cuerpo de la botella es cercano a cero. Los cambios de presión en la botella se deben a las propiedades elásticas del gas en su interior y proveen la fuerza restauradora que actúa sobre el tapón de aire (análogamente a una masa y un resorte).

El análisis del comportamiento de un resonador de Helmholtz llevando a un circuito equivalente que interpreta el funcionamiento de cada una de sus partes.

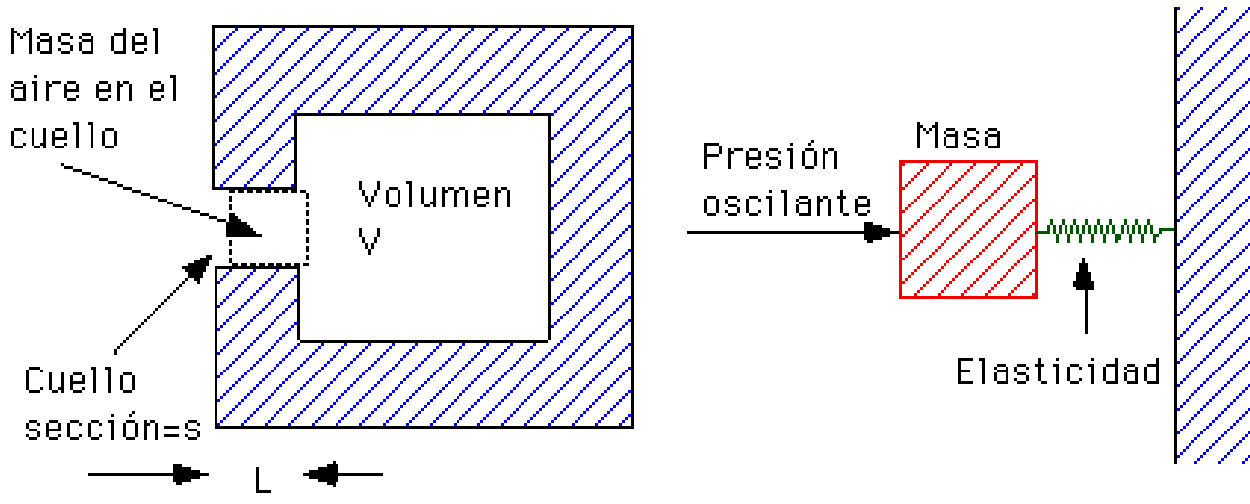


Figura 15 Resonador Helmholtz
http://www.labc.usb.ve/EC4514/AUDIO/ACUSTICA_ARQUITECTONICA/Control_acustico.html

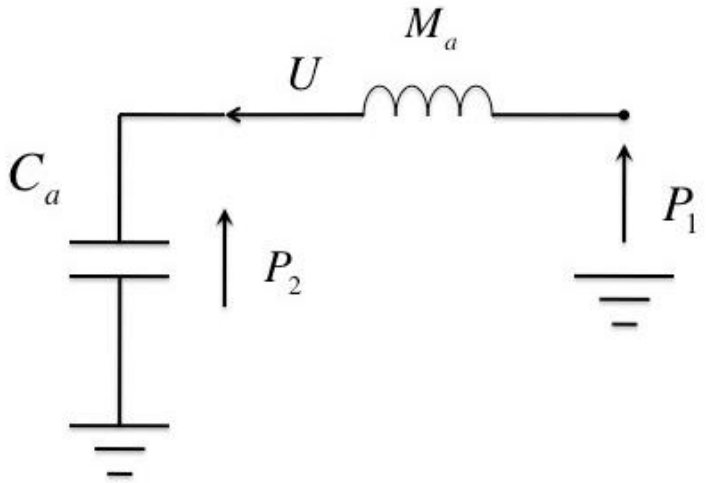


Figura 16. Circuito equivalente resonador Helmholtz

La frecuencia de resonancia de un resonador de Helmholtz puede obtenerse con la expresión:

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{S}{L'V}} \tag{2.37}$$

donde S constituye la boca del resonador, L' la longitud efectiva del cuello y V el volumen que encierran las paredes de la cavidad.

3. METODOLOGÍA

3.1 ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN

En este proyecto manejará un enfoque empírico analítico, pues el interés está enfocado a utilizar todo el saber adquirido durante los años de estudio para crear, mejorar o replantear herramientas que sirvan para los nuevos grupos de investigación.

Esta propuesta, gracias al conocimiento en el área de acústica, electrónica y diseño de sistemas de sonido, pretende llegar a producir un prototipo de uso sencillo en los procesos de análisis de sustancias, aplicado a transporte sin contacto. Se buscará la consolidación de este a partir de unos requerimientos que debe cumplir el producto final.

La metodología del proyecto tendrá varias partes. En la primera parte se llevarán a cabo los cálculos y mediciones correspondientes tanto para la muestra elegida como para identificar los parámetros y patrones de diseño necesarios del dispositivo. A partir de dichos cálculos será posible generar el diseño inicial del dispositivo e identificar sus requerimientos técnicos.

Finalmente, se podrá construir el prototipo que cumpla con las condiciones propuestas y realizar las respectivas mediciones y correcciones de acuerdo a los resultados arrojados por el trabajo de campo.

Generar las conclusiones finales.

3.2 LÍNEA DE INVESTIGACIÓN DE USB / SUB - LÍNEA DE FACULTAD / CAMPO TEMÁTICO DEL PROGRAMA

Sub - línea de Investigación de la Facultad: Instrumentación y Control de Procesos.

Acústica Física

La sociedad requiere de nuevos conocimientos vanguardistas en la medida de lo posible, en la búsqueda de estos aspectos técnicos y científicos el ingeniero de hoy se enfrenta con la solución de problemas y nuevos procesos que faciliten el mejoramiento de herramientas requeridas en las nuevas etapas de trabajo.

3.3 TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN

Para realizar el proyecto, la información necesaria será obtenida a través de diferentes colaboraciones, investigaciones, estudios y trabajos existentes en bibliotecas y bases de datos de organizaciones especializadas en acústica como AES, así como pertenecientes a otras áreas de la ingeniería como IEEE y asesorías docentes tanto en procesos de investigación como de producción.

3.4 HIPÓTESIS

Si se analizan, interpretan y aplican los diferentes fenómenos físicos involucrados en el proceso de levitación acústica de partículas o sustancias aplicadas a transporte sin contacto, entonces es posible diseñar y construir un prototipo que sea capaz de reproducir dichos fenómenos físicos y mediante una onda estacionaria y nodos de presión generar levitación acústica sobre una muestra.

3.5 VARIABLES

3.5.1 VARIABLES INDEPENDIENTES

Frecuencia, capacidad de los dispositivos empleados como son: driver, generador, amplificador.

3.5.2 VARIABLES DEPENDIENTES

Muestra, estabilidad y confiabilidad del prototipo

4. DESARROLLO INGENIERIL

4.1 DELIMITACIÓN DE LA MUESTRA

Para obtener un resultado óptimo en el proceso de levitación se deben involucrar factores propios de la muestra como tamaño, densidad y masa principalmente. Otras variables como su resistencia al calor o conductividad eléctrica son despreciables dado que no afectan significativamente el proceso experimental.

Así mismo, es importante tener en cuenta que la forma de las muestras debe permitir una homogénea distribución de energía sobre su superficie para facilitar un estado de equilibrio y ser capaz de mantener su rigidez al ser sometida al campo sonoro. Para el caso experimental se determina el uso de una esfera, puesto que esta es homogénea en su superficie y permite una distribución de energía más estable que otras formas regulares como cubos.

4.1.2 PRESELECCIÓN DE MATERIALES DE PRUEBA

Conociendo que la muestra debe tener una forma esférica, se toman en cuenta tres materiales que son de fácil acceso con la forma anteriormente mencionada.

Dichos materiales son, en sus respectivas presentaciones, una esfera de poliestireno expandido y una esfera de plástico.

Se determinan criterios de evaluación basados en sus propiedades físicas. Dichos criterios son volumen, densidad y masa, buscando las dimensiones adecuadas con el menor peso posible.

4.1.2.1 POLIESTIRENO EXPANDIDO

Las esferas de poliestireno expandido son bastante fáciles de conseguir comercialmente y así mismo presentan un valor bastante favorable.

Por efectos del calor el poliestireno tiende a reblandecerse, sin embargo los cambios de temperatura presentados dentro del dispositivo no deberán ser significativos para el material.

Figura 17. Láminas de poliestireno expandido.

Específicamente la muestra esférica de poliestireno expandido de 6 cm de diámetro y tiene una densidad alrededor de:

$$\rho = 20 \ {}^{Kg}/_{M3} \tag{4.1}$$

De esta manera, a partir del diámetro de la esfera y su respectivo valor de densidad, es posible calcular el volumen V de la esfera:

$$V = \frac{4\pi(0{,}03m)^3}{3}$$

$$V = 1{,}13 \times 10^{-4} m^3$$

(4.2)

Finalmente podemos determinar su masa como:

$$m = 20\ \frac{Kg}{m3} \times 1{,}13 \times 10^{-4} m3$$

$$m = 2{,}26\ grs$$

(4.3)

Figura 18. Esfera de Poliestireno expandido.

4.1.2.2 PLÁSTICO

Al igual que en el caso del icopor, las esferas de plástico son de fácil acceso comercial en presentación de pelota de ping pong, presentando un bajo costo.

Es un material termoplástico, deformable a temperaturas superiores a los 120º centígrados, por lo cual no presenta ningún tipo de restricción en cuanto a temperatura de la cámara.

Figura 19. Pelota de Ping Pong.

Las pelotas de ping pong tienen un diámetro sea de 4 cm, así que su volumen será:

$$V = \frac{4\pi(0{,}02m)^3}{3}$$

$$V = 3{,}35 \times 10^{-5} m^3$$

(4.4)

Así mismo, la masa de la pelota es de:

$$m = 3\ grs$$

(4.5)

Por lo que la pelota presenta una densidad aproximada de:

$$\rho = 86{,}56\ {}^{Kg}/_{M3}$$

(4.6)

4.1.3 SELECCIÓN DE MATERIAL DE MUESTRA

Teniendo en cuenta los materiales y los parámetros mencionados anteriormente, es posible contrastar mediante una tabla las características de cada uno.

	ICOPOR	PLASTICO
DENSIDAD (kg/m3)	20	85,56
MASA (grs)	2,26	3
VOLUMEN (m3)	0.00013	0.000045

Tabla 1. Comparación de parámetros de las muestras preseleccionadas.

De acuerdo a lo anterior es posible ver que, a pesar de tener un mayor volumen, la masa y densidad del icopor son menores que las de la esfera de plástico, lo que permite una mejor visualización del

fenómeno físico con un objeto de mayor tamaño al usar una esfera de poliestireno expandido.

La muestra inicial seleccionada para el diseño del dispositivo es, entonces, una esfera de poliestireno expandido.

4.2 FRECUENCIA DE RESONANCIA IDEAL

Al conocer las características propias de la muestra es posible también determinar qué frecuencia se debe generar en virtud de su tamaño y de acuerdo a una relación de longitud de onda así:

$$\text{Diámetro de la muestra} \leq \frac{1}{2}\lambda \tag{4.7}$$

De acuerdo a esta relación es posible despejar la frecuencia:

$$\frac{340\,\frac{m}{s}}{0{,}06m} = 5666{,}66\,Hz \tag{4.8}$$

Sabiendo que entre menor sea la dimensión del objeto frente a la longitud de onda de levitación, es posible reducir la frecuencia a generar hasta cerca de diez veces la correspondiente a la longitud de onda equivalente al

diámetro del objeto (relación de diez a uno), es decir que se puede generar una frecuencia entre 550 Hz y 600 Hz..[19]

Figura 19. Generador de frecuencias.

Para fines prácticos se usará como frecuencia de levitación 580 Hz, lo que permitirá la levitación con un menor nivel de presión sonora debido a la relación de diez a uno previamente mencionada entre la longitud de onda y el diámetro del objeto.

$$\lambda = c/f \Rightarrow \lambda = \frac{344 m/s}{580 Hz}$$

$$\lambda = 0.59 mt \qquad (4.9)$$

Donde c es la velocidad del sonido a 21°C.

[19] Ling, M. (2006), *Acoustic Levitator as a Tool for X Ray Tomography.*

4.3 NIVEL DE PRESIÓN SONORA REQUERIDO

Teniendo en cuenta las características de la muestra delimitada, es fundamental obtener la cantidad de energía acústica que es necesaria para contrarrestar la gravedad en dicho material.

Para obtener dicho nivel de energía es necesario también determinar el número de onda e incluirlo en la ecuación de Lupi.

$$k = \frac{2\pi}{0{,}59\ mt} = 10{,}54$$

(4.10)

Al remplazar:

$$\overline{E}_{\min} \approx (4\rho_l g/5k) \Rightarrow \overline{E}_{\min} \approx \left(\frac{4(20kg/m^3)\cdot 9.8(m/s^2)}{5(10.59)} \right)$$

$$\overline{E}_{\min} \approx 14.8J$$

(4.11)

Que convirtiendo a watts representan:

$$14.8J \approx 0.00411W \cdot h$$

(4.12)

Este valor en watts es posible incorporarlo al cálculo del nivel de potencia acústica *Lw*:

$$Lw = 10 \cdot \log \frac{w_1}{w_0} \Rightarrow Lw = 10 \cdot \log \frac{0.0041}{10^{-12} w}$$

$$Lw = 86{,}12\, dB$$

(4.13)

El nivel de potencia acústica *Lw* calculado se puede relacionar directamente con el nivel de presión acústica *Lp* que finalmente debe ser generado para lograr la levitación de la muestra así:

$$Lp = (86{,}12) - 20\log(0.6m) - 11$$

$$Lp = 101{,}41 dB$$

(4.14)

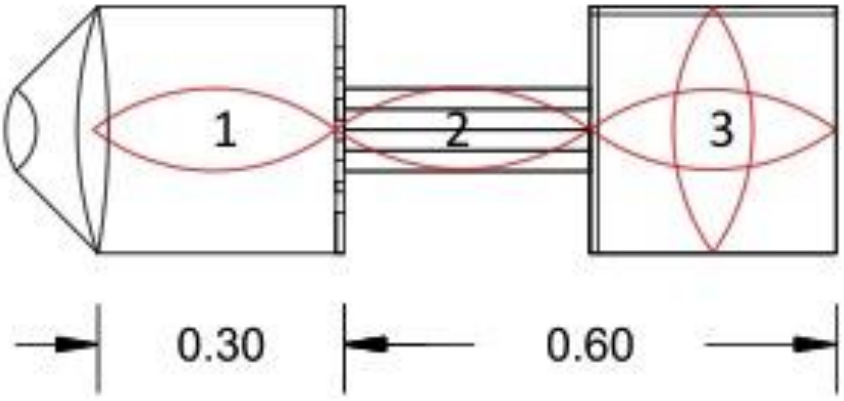


Figura xx. Puntos de reflexión en la cámara.

Donde 0.6m es la distancia que separa la cámara en la cual se recrea el ámbito de presión necesaria (1) del punto en el cual la onda es reflejada (3).

4.4 PARÁMETROS DE DISEÑO

4.4.1 DIMENSIONES DEL DISPOSITIVO

Tomando $\lambda = 0.59mt$ un resonador con una longitud de 0.6mt presentará condiciones favorables para que la frecuencia indicada (580 Hz) produzca la onda estacionaria necesaria.

A esta distancia se produce un desfase de 180°, en el cual se cancelan las ondas planas y los modos de frecuencia necesarios se quedaran para producir la onda estacionaria necesaria.

Esta longitud corresponde a un ciclo completo de la onda en cuestión, a la cual habrá que sumarle medio ciclo adicional representado en la longitud de la sección cilíndrica que se acopla a la boca del tubo del resonador tomando que el punto dentro de la longitud de onda en el cual la fuerza es ampliada (kh) se presentará a $0.78m$ de la fuente sin importar la frecuencia, a esta distancia se encontrará el estado de equilibrio.

Por lo tanto, la longitud total del dispositivo a partir de la fuente sonora es:

$$L = 0,6\ mt + 0,3\ mt = 0,9\ mt \tag{4.15}$$

Donde L es la longitud correspondiente a un plano axial.

Para tener control sobre dos o más ejes se debe realizar el acople de la misma longitud en los ejes correspondientes. En este caso, la longitud L está representada en el eje vertical y en uno de los laterales.

4.4.2 SECCIONES DEL DISPOSITIVO

Para representar las longitudes sugeridas, se divide L correspondiente a cada eje del dispositivo en tres partes con la misma medida de largo.

4.4.2.1 CAMARA RESONANTE

Es el cubo donde las muestras son situadas, con medida de 0,3 mt, su volumen interno será:

$$V = 0{,}3\ mt * 0{,}3\ mt * 0{,}3\ mt = 0{,}027\ mt^3$$

(4.16)

4.4.2.2 GUÍA DE ONDA

Es la sección que compone al tubo del resonador. La circunferencia de la boca de este tubo debe corresponder a una relación respecto la longitud de onda así:

$$S = \frac{\lambda}{4}$$

(4.17)

Esta relación corresponde a la medida interna del tubo, por lo que se debe tener en cuenta el grosor de pared del mismo al momento del ensamble.

4.4.2.3 SECCIÓN CILÍNDRICA

Esta parte del dispositivo corresponde al ducto por el cual la onda sonora se desplaza inmediatamente después de ser generada por la fuente.

El diámetro interno de esta sección debe ser idéntico al largo de la cámara resonante de forma que:

$$d = 0.3\ mt$$

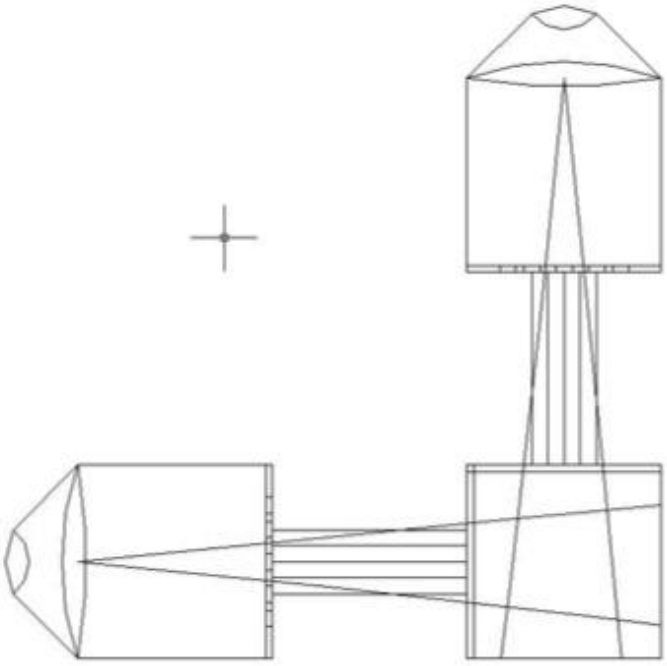


Figura 25. Diagrama dimensional del dispositivo.

4.4.3 FRECUENCIA DE RESONANCIA DEL DISPOSITIVO

La frecuencia de resonancia de un resonador de Helmholtz puede obtenerse con la expresión:

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{S}{L'V}}$$

(4.18)

Donde S constituye la boca del resonador, L' la longitud efectiva del cuello y V el volumen que encierran las paredes de la cavidad, longitud real del cuello (L'), debido a la energía concentrada:

$$L' = 2\left(\frac{8r}{3\pi}\right) + L \Rightarrow L' = 2\left(\frac{8(0.0375mt)}{3\pi}\right) + 0.3$$

$$L' = 0.36mt$$

(4.19)

Donde r es el radio de la apertura y L la longitud del tubo.

Boca del resonador (S):

$$S = L + 0.8(d) \Rightarrow S = 0.3 + 0.8(0.075)$$

$$S = 0.36mt^2$$

(4.20)

Donde d es el diámetro

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{0.36mt}{0.36mt \cdot 0.027mt^3}}$$

$$f_0 = 333{,}2Hz$$

(4.21)

Al tener estas diferencias entre la frecuencia de operación del levitador y la frecuencia de resonancia del resonador se puede manipular la muestra en sus ejes al cambiar la frecuencia consecuentemente la longitud de onda con sus respectivos nodos y antinodos para lograr el movimiento de la muestra, así como el análisis de mayor diversidad de muestras.

Frecuencia de operación: 580 Hz

Frecuencia de resonancia: 333.2 Hz

Diferencia de frecuencias para manipulación: 246.8Hz

4.5 EVALUACIÓN DE MATERIALES CONSTRUCTIVOS

Para la selección de los materiales constructivos se tuvieron en cuenta los criterios de densidad, rigidez, durabilidad, facilidad de trabajo y costos. Así mismo, se dividió el dispositivo en tres secciones para evaluar el material más eficiente en cada una de ellas. Dichas secciones son la cámara resonante, las guías de onda y la estructura cilíndrica acoplada a cada parlante.

4.5.1 CÁMARA RESONANTE

Para la cámara resonante se hizo una evaluación con los siguientes materiales.

4.5.1.1 VIDRIO

Densidad: La densidad del vidrio común depende tanto de la naturaleza de las materias primas, como de la composición química del producto obtenido. Comercialmente se trabaja una densidad aproximada de 2,49 g/ cm3.

Rigidez: Es un material de alta rigidez, con poca resistencia maleable por métodos básicos.

Durabilidad: Descontando el estrés mecánico y cargas excesivas, es un material extremadamente duradero, resistente a ácidos, líquidos y exposición a agentes climáticos. Su deterioro en el

tiempo es superficial en la mayoría de los casos y puede soportar décadas e incluso siglos con mantenimiento.

Facilidad de trabajo: Es fácil de trabajar en el corte de placas planas con herramienta especializada, sin embargo es frágil al estar expuesto a constante transporte.

Costos: Su precio oscila de acuerdo al tamaño y grosor de las placas, siendo en general medio – alto.

Figura 26. Laminas de vidrio.

http://www.cristalesventureli.com.ar/vidrio-basico.html

4.5.1.2 POLICARBONATO

Densidad: El policarbonato está constituido de polímeros que presentan grupos funcionales unidos por grupos carbonato en una larga cadena molecular y tienen, según su formación química, una densidad aproximada de 1,2 g/cm3.

Rigidez: Es un material rígido, ampliamente versátil y modificable mediante manufactura especializada.

Durabilidad: Presenta una excelente resistencia a la intemperie y a condiciones atmosféricas severas, así como una resistencia al impacto cincuenta veces mayor que el vidrio.

Facilidad de trabajo: Este material es muy versátil y fácil de trabajar, moldear y termoformar para su manufactura.

Costos: Es un material costoso. La lámina de 2,9 mts x 1,2 mts y 6mm de espesor tiene un costo cercano a los $3’000.000 de pesos.

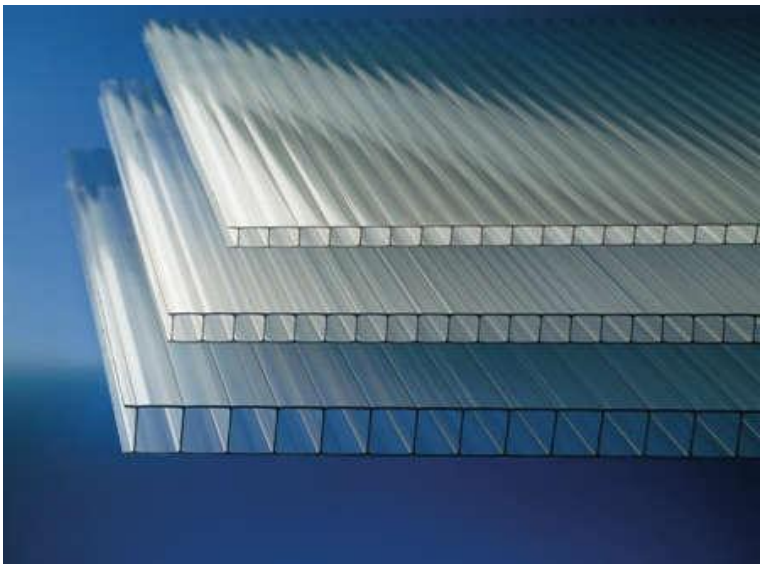


Figura 27. Lámina acanalada de policarbonato

http://www.arkos.com.co/

4.5.1.3 PLEXIGLASS (ACRÍLICO)

Densidad: También conocido como polimetilmetacrilato, este acrílico ligero presenta una densidad de 1190 Kg/m3.

Rigidez: Es un material rígido, de dureza similar al aluminio y con una resistencia al impacto veinte veces mayor a la del vidrio.

Durabilidad: Altamente durable y resistente a condiciones atmosféricas, resistente a la intemperie y rayos ultravioleta.

Facilidad de trabajo: Tiene una gran facilidad de mecanización y moldeo. Es posible mecanizarlo en frio, pero no moldearlo por lo que es necesario aplicar calor local y usar herramientas especializadas.

Costos: La placa de 1,2mts x 1,8 mts y 10 mm de espesor tiene un costo alrededor de $400.000 pesos.

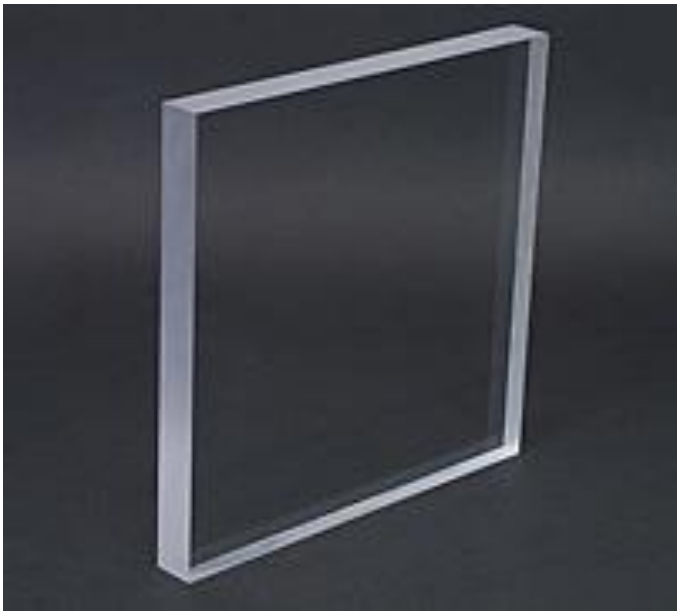


Figura 28. Placa de plexiglass.

http://www.estreetplastics.com/Plexiglass_Sheets_Clear_s/21.htm

4.5.2 GUIAS DE ONDA

Para el caso de la estructura tubular que compone las guías de onda se estudiaron dos materiales, el acrílico termoformado anteriormente mencionado y el policloruro de vinilo o PVC.

4.5.2.1 POLICLORURO DE VINILO (PVC):

Densidad: Este polímero presenta una baja densidad, cercana a 1,4 g/cm3.

Rigidez: Es moderadamente rígido. Al entrar en contacto con fuentes de calor, aún por breves periodos de tiempo, presenta deformación permanente.

Durabilidad: Altamente durable. Puede estar en servicio hasta por más de sesenta años en aplicaciones de conducción de agua potable, sanitarios y ventilación

Facilidad de trabajo: Es muy fácil de trabajar y termoformar. Dadas las medidas de fabricación en serie es posible encontrar el diámetro óptimo en para el dispositivo acústico en el mercado.

Costos: Es muy económico, teniendo el metro de tubo de 3 pulgadas de diámetro un costo de cerca de $20.000.

Figura 29. Tuberias de PVC

4.5.3 ESTRUCTURA CILÍNDRICA

Para la fabricación de la estructura cilíndrica se contemplaron como materiales idóneos el acrílico termoformado y la fórmica de madera.

Figura 30. Láminas de fórmica en diferentes calibres.

4.5.4 SELECCIÓN DE MATERIALES CONSTRUCTIVOS

De acuerdo al estudio hecho a los posibles materiales constructivos del dispositivo acústico, se llega a la selección de los materiales definitivos para iniciar posteriormente el proceso de fabricación y ensamble.

En el caso del material de fabricación del cubo resonante se emplea una tabla de calificaciones para determinar el material que mejor se adapta a las necesidades presentando calificaciones de 1 a 5, donde 1 es la peor y 5 la mejor, en cada uno de los aspectos evaluados.

	VIDRIO	POLICARBONATO	PLEXIGLASS
DENSIDAD	5	4	4

RIGIDEZ	4	4	4
DURABILIDAD	5	5	5
F.DE TRABAJO	1	4	4
COSTOS	3	1	5
TOTAL	18	18	22

Tabla 2. Calificación de materiales.

Para el caso de las guías de onda y las estructuras cilíndricas se determinó el uso de PVC y fórmica respectivamente por su costo mucho más benéfico.

4.5.5 CARACTERISTICAS DE LOS MATERIALES SELECCIONADOS

Como se describió anteriormente, los materiales seleccionados para la construcción del modelo fueron plexiglass, PVC y fórmica de madera para la cámara resonante, la guía de onda y la sección cilíndrica respectivamente.

En el caso del plexiglass se emplea una lámina de 10 mm de espesor y de 1,2 mt x 1,8 mt, a la que se le cortarán todas las secciones necesarias.

El tubo de PVC empleado en la guía de onda es de tipo sanitario y tiene un espesor de 6 mm y una longitud total de 1 mt para hacer las particiones necesarias.

Finalmente para la sección cilíndrica acoplada a la fuente se emplea una lámina de fórmica de 1,2 mt x 1,8 mt que se moldeará en el proceso de ensamble.

4.6 FUENTES SONORAS

Gracias a la delimitación de la muestra, a la fijación de una frecuencia de operación del sistema y al cálculo del nivel de presión sonora requerida se tienen suficientes datos para determinar el tipo de fuente necesaria.

En primer lugar es importante considerar que la direccionalidad de la fuente, aunque puede variar de acuerdo a cada fabricante y proceso de manufactura, estará fundamentalmente basada en el uso de guías de onda, pues entre más alta sea la frecuencia la fuente tiende a ser más direccional.

Como segundo punto, el sistema deberá ser alimentado por dos fuentes; una sobre el eje de la fuerza de gravedad para generar la levitación y otra sobre el eje horizontal que permita movimiento lateral, por lo que se deben usar dos parlantes.

Por razones de disposición y presupuesto se emplean los siguientes dos parlantes:

- Celestion Truvox 1520

- Electrovoice EVM 15 DLX

4.6.1 CELESTION TRUVOX 1520

Este parlante de 15 pulgadas y 150 watts rms se tiene en cuenta inicialmente porque se tiene disposición inmediata y económica sobre él.

Figura 20. Parlante Celestion Truvox 1520
http://professional.celestion.com/pro/pdf/TF1520.pdf

Al entrar a analizar sus características se encuentra una adecuada respuesta en el rango de frecuencias a trabajar, generando aproximadamente 100 dB en 580 Hz, por lo que se decide incluirlo de manera permanente.

Debido a la potencia que soporta se decide dejarlo en trabajo sobre el eje horizontal para no sobrepasar su límite de trabajo y emplear un parlante con mayor admisión de potencia sobre el eje vertical.

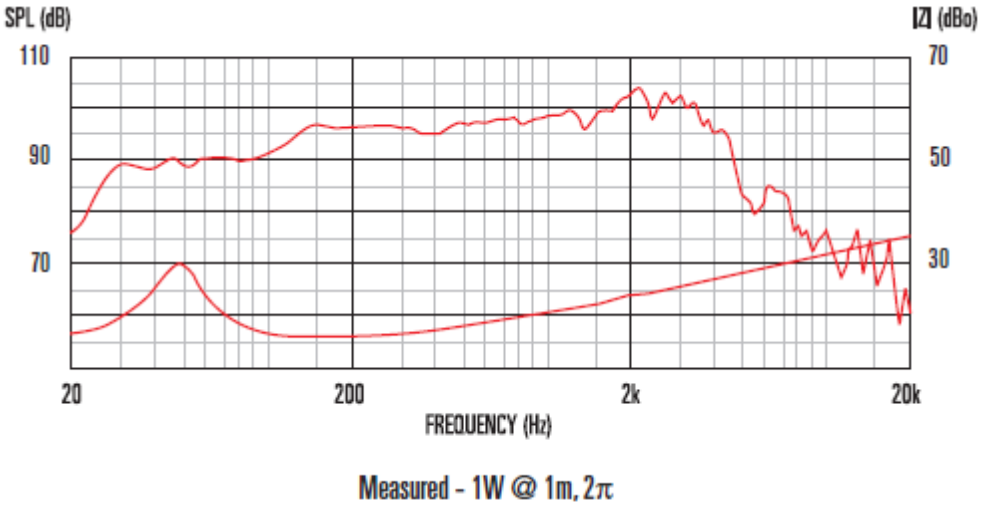


Figura 21. Respuesta en frecuencia Celestion Truvox
http://professional.celestion.com/pro/pdf/TF1520.pdf

Este parlante presenta un valor de sensibilidad de 96 dB, a partir del cual es posible calcular el nivel de presión sonora generado a la distancia de ubicación de la muestra. Si se tiene en cuenta que la muestra está ubicada a 0,9 metros del parlante, entonces se obtiene un valor de presión sonora al interior de la cámara de:

$$SPL = 96dB + 10Log\frac{150}{1} + 10Log\left(\frac{1^2}{0{,}9^2} + 16\pi * \frac{1-0{,}1}{0{,}377}\right)$$

SPL = 137 dB

(4.22)

4.6.2 ELECTROVOICE EVM 15 DLX

Este parlante, al igual que el Celestion, es de 15 pulgadas pero presenta una potencia de 400 watts rms, lo que permite una mayor tolerancia para el régimen de trabajo en el eje vertical.

Figura 22. Parlante Electrovoice EVM 15 DLX

Este parlante, con impedancia de 8 ohms, presenta una sensibilidad de 88 dB, por lo cual podemos obtener que:

$$SPL = 88dB + 10Log\frac{300Watts}{3Watts} + 10Log\left(\frac{1^2}{0{,}9^2} + 16\pi * \frac{1-0{,}1}{0{,}377}\right)$$

SPL = 119 dB

(4.23)

4.6.3 GENERADOR DE FRECUENCIA

Para efectos de la prueba en la Universidad de San Buenaventura, se hace uso de los generadores disponibles en los laboratorios de acústica, es decir el Peaktech 4025 de fabricación alemana.

Figura 23. Generador Peaktech 4025.

http://www.peaktech.de/productdetail/kategorie/dds-funktionsgeneratoren/produkt/p-4025.html

4.6.4 AMPLIFICADORES DE SEÑAL

Al igual que con el generador de frecuencias, se hace uso de los amplificadores disponibles en el departamento de sonido en vivo, teniendo en cuenta el más adecuado conforme a sus especificaciones de impedancia y potencia.

Para el desarrollo ingenieril se elige el Crest Audio CA de modo estéreo, a 8 ohms.

Figura24. Amplificador Crest Audio CA 4

http://www.crestaudio.com/products/browse.cfm/action/detail/item/116223/number/CFA-CA4-AB/cat/319/CA%204.cfm

4.7 DISEÑO PRELIMINAR

Teniendo en cuenta los parámetros de diseño y los materiales seleccionados para la elaboración del dispositivo, es posible realizar un primer acercamiento visual al modelo terminado mediante el diseño tridimensional del dispositivo.

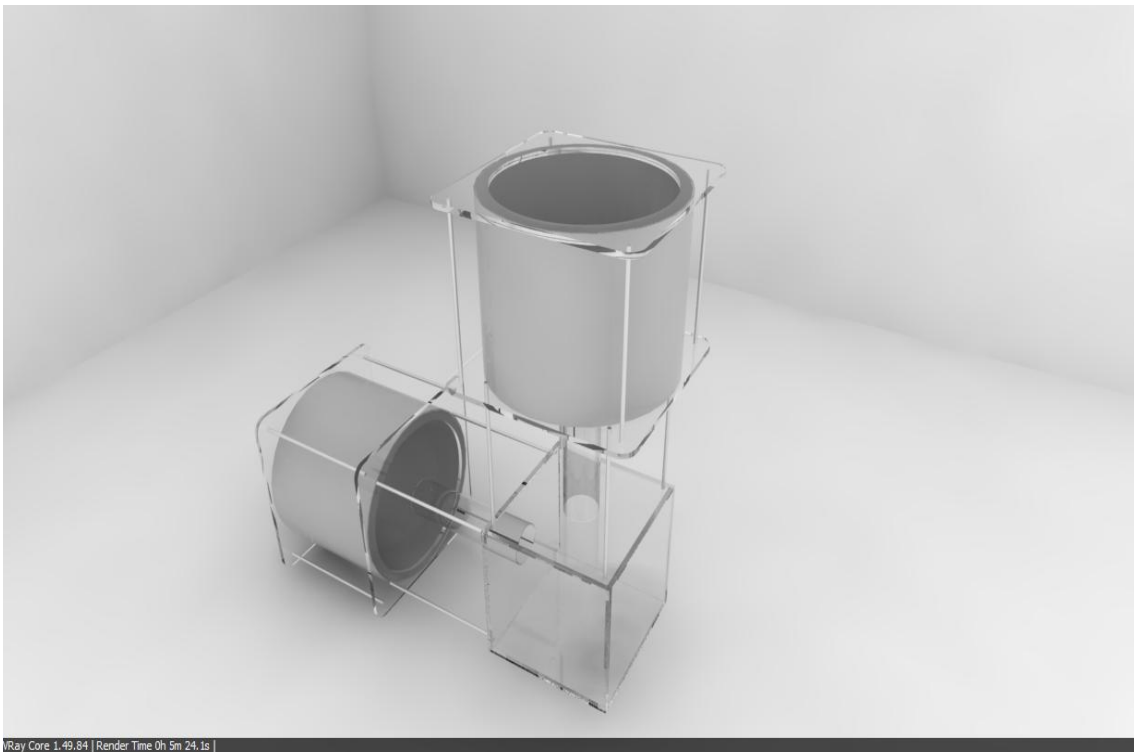


Figura 31. Vista del dispositivo renderizado.

Para tal fin se hace el levantamiento tridimensional de la estructura en el programa de modelado Rhinoceros, y posteriormente se le dan los acabados en la máquina de render VRay Core.

Figura 32. Vista lateral del dispositivo renderizado.

Teniendo en cuenta que se deben realizar acoples y estructuras de soporte para resistir tanto el peso de los parlantes, como la presión sonora que la estructura debe contener internamente, se agregan placas de plexiglass a cada extremo de los cilindros de fórmica que permiten el anclaje mediante la instalación de tubos metálicos de soporte estructural.

Figura 33. Vista posterior del dispositivo renderizado.

Figura 34. Vista isométrica dispositivo renderizado.

4.8 PROCESO CONSTRUCTIVO DEL DISPOSITIVO

Luego de obtener los diseños finales es posible iniciar la etapa de construcción del modelo que será objeto de las pruebas de laboratorio.

Para ello se adquieren los materiales fundamentales de los que está compuesto como son lámina de plexiglass, tubería en PVC sanitario y fórmica.

Dada la complejidad del modelo, es necesario acudir a personal especializado para el tratamiento y manipulación adecuada de los materiales y de esta forma lograr una fabricación rigurosa y muy aproximada al modelo teórico contemplado. La empresa seleccionada para realizar el corte y ensamble de las piezas es Dmarco Aéreo Ltda, situada en la ciudad de Bogotá.

Dicha empresa se especializa en la fabricación y modificación de paneles de instrumentos, trabajos de refuerzo para antenas y equipos y el desarrollo de directivas de navegabilidad, todo en el campo aeronáutico. Actualmente Dmarco Aéreo Ltda se encuentra en

proceso de certificación como taller de estructuras tipo I y II por parte de la aeronáutica civil de Colombia.

Como primera medida se realizan los planos en AutoCAD de las piezas que deben ser cortadas de la lámina de plexiglass. Estos planos son usados por la máquina para corte CNC Panel Pro, controlada mediante computador y optimizada para cortar laminas de aluminio. Esta máquina está especialmente diseñada para la fabricación de paneles para la industria aeronáutica.

Figura 35. Máquina de corte CNC Panel Pro.

De la placa de plexiglass de 10 mm de espesor se extraen las seis caras del cubo y cuatro láminas adicionales de apoyo al ensamble de la sección cilíndrica acoplada a los parlantes.

Figura 36. Fraccionamiento de la placa de plexiglass.

El sistema de acople de los tubos de PVC a las caras tanto de la cámara resonante como a la sección cilíndrica se hace por presión, haciendo una ranura circular de precisión en cada extremo que permite la entrada a presión de la sección de tubo.

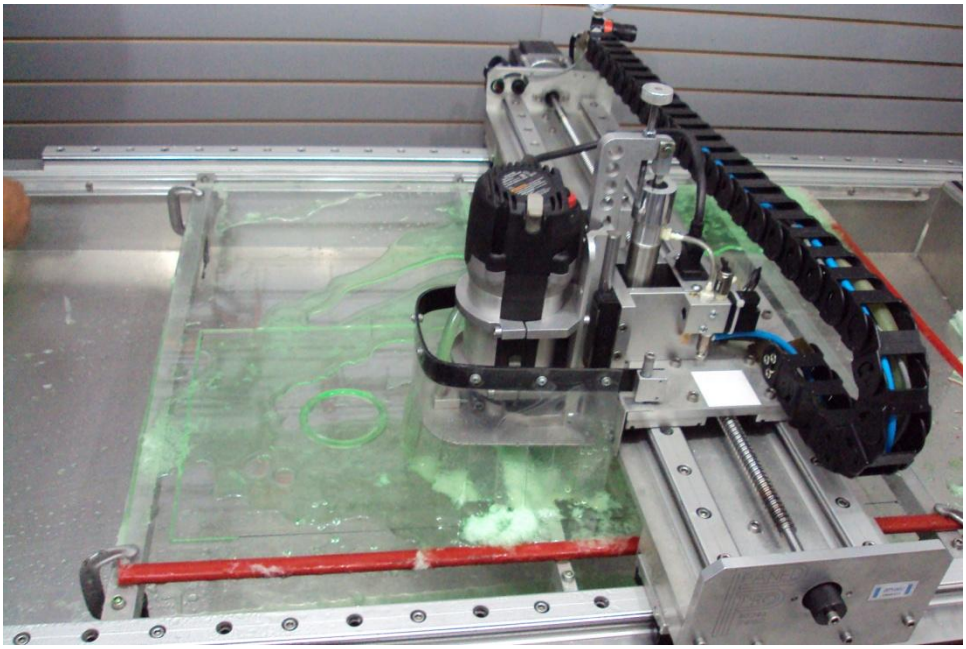


Figura 37. Proceso de corte de las caras de la cámara resonante.

Posteriormente, los tubos son cortados a sus dimensiones definitivas y encajados a las placas resultantes del corte de plexiglass.

Figura 38. Corte de tubos de PVC.

Figura 39. Acople de tubo PVC a cara lateral de plexiglass.

Para la fabricación de la sección cilíndrica se moldea la fórmica y se adhiere a los bordes acrílicos que le corresponden para mantener su posición estructural.

Figura 40. Pegado de la sección de estructura cilíndrica en fórmica.

Para fortalecer la estructura del dispositivo y soportar los pesos incidentes de los parlantes sobre la fórmica, se instalan tubos de soporte metálicos atornillados a los extremos acrílicos.

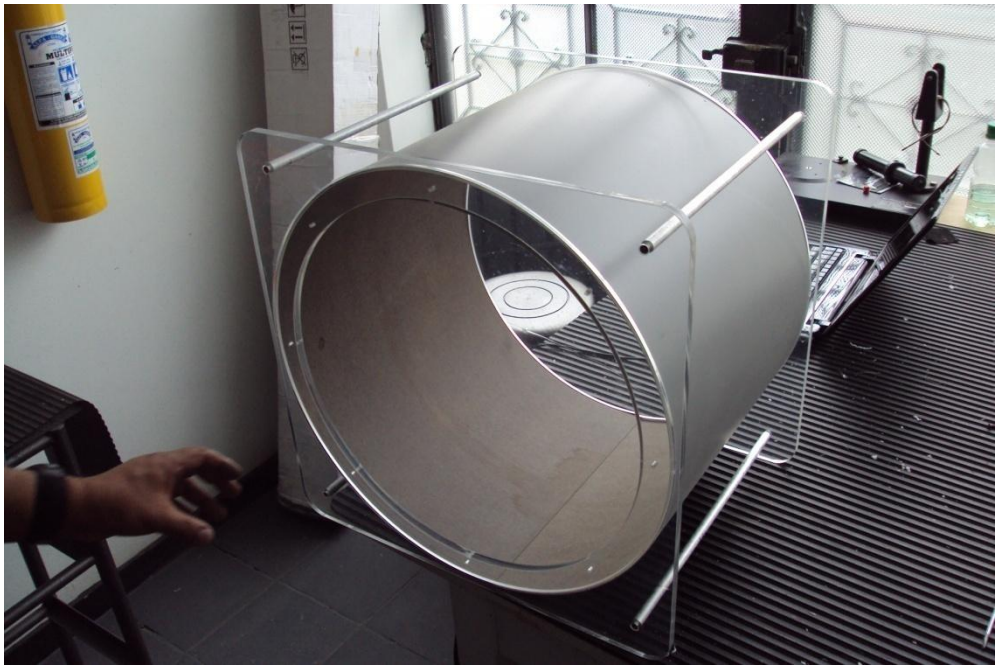


Figura 41. Instalación de tubería de soporte estructural.

Una vez cortadas las caras de la cámara resonante, se procede al pegado de sus caras. Este proceso se hace mediante el uso de una sustancia llamada ácido acético, que permite el acople firme y definitivo entre las placas acrílicas.

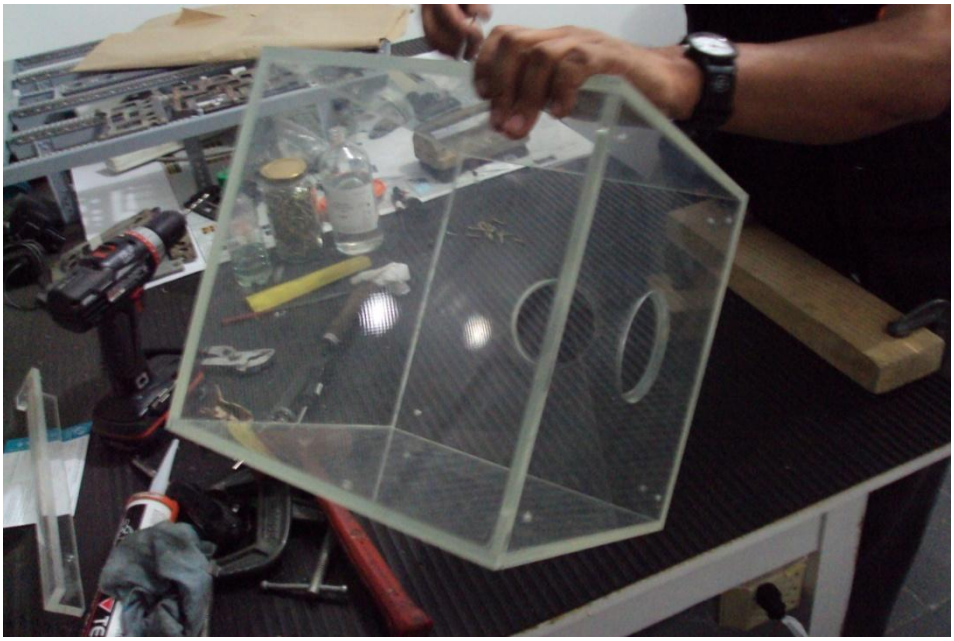


Figura 42. Ensamble de cámara resonante.

Al igual que con la sección cilíndrica, a la cámara se le instalan tubos de soporte para ayudar a la sección de tubo de PVC a soportar todo el peso descendente.

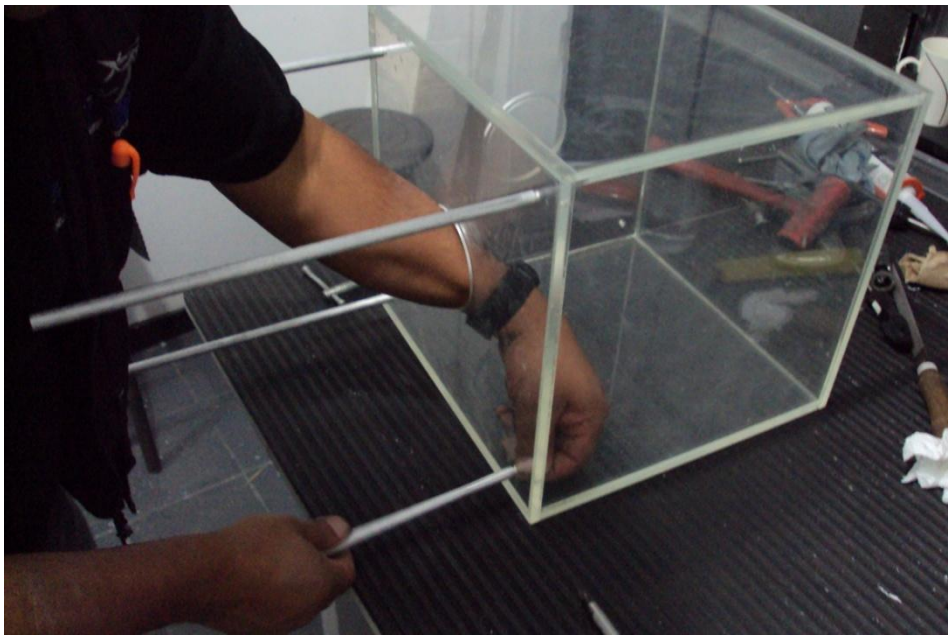


Figura 43. Acople de tubería de soporte para la cámara resonante.

Luego de la instalación de la tubería de soporte estructural se procede al ensamble de todas las secciones mediante tornillos.

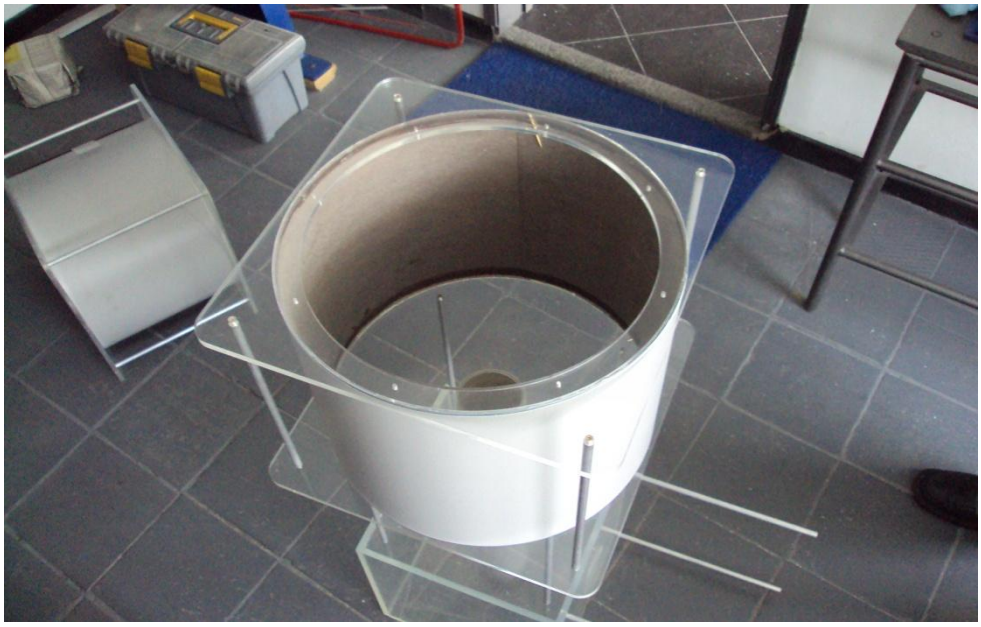


Figura 44. Ensamble de las secciones mediante tornillos.

Se debe tener en cuenta que los tubos de PVC no van sujetos por elementos externos, sino por la simple acción del hermetismo generado a través de cortes de precisión, razón por la cual se debe tener cuidado en el transporte del dispositivo.

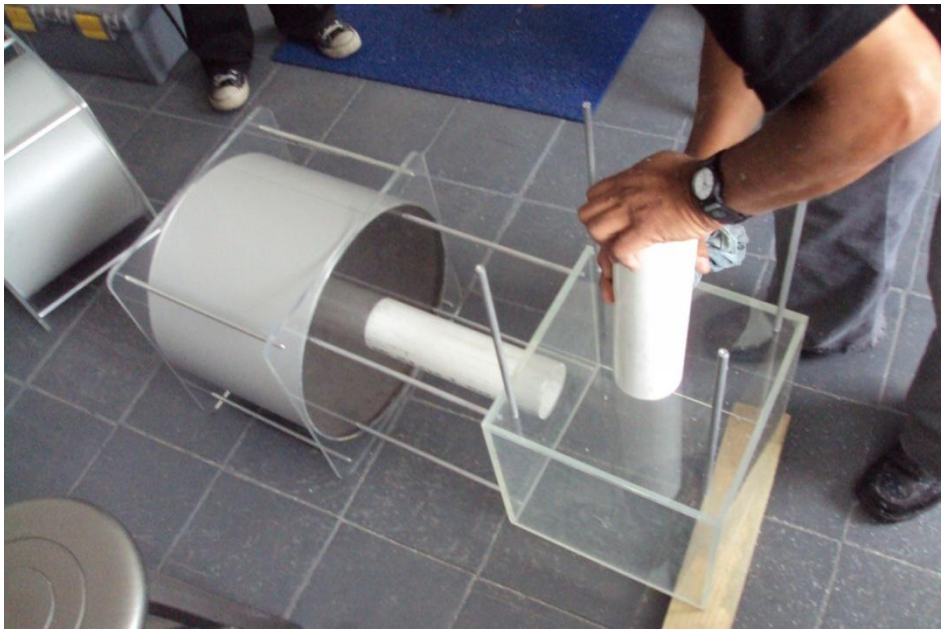


Figura 45. Acople a presión de tubos guía de onda en PVC.

Finalmente, luego de instalar todas las partes, los parlantes son atornillados a los extremos acrílicos de las secciones cilíndricas para sujetarlos firmemente y quedar listos para el proceso de prueba.

Figura 46. Instalación de los parlantes al dispositivo acústico.

5. RESULTADOS

5.1 MONTAJE DEL SISTEMA

Para el desarrollo de la prueba del dispositivo de levitación acústica se debe tener en cuenta que el flujo de la señal de salida desde los generadores debe ser de la siguiente forma:

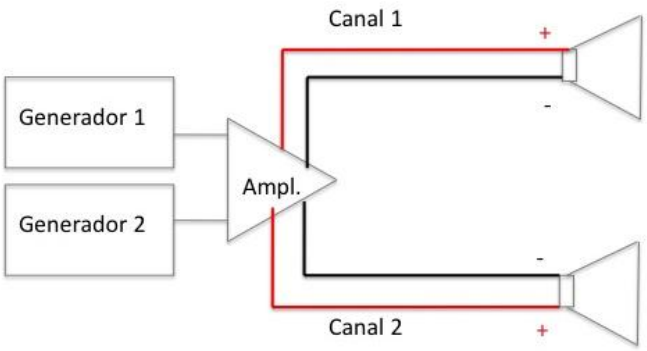


Figura 47. Diagrama de flujo de señal.

Las cajas nombradas como Generador 1 y Generador 2 corresponden a cada uno de los canales del mismo generador estéreo, que reproducen simultáneamente la frecuencia a trabajar.

Así mismo, para que este flujo de señal sea correcto se deben tener en cuenta las conexiones de los equipos a trabajar, que están conectados de acuerdo al siguiente diagrama:

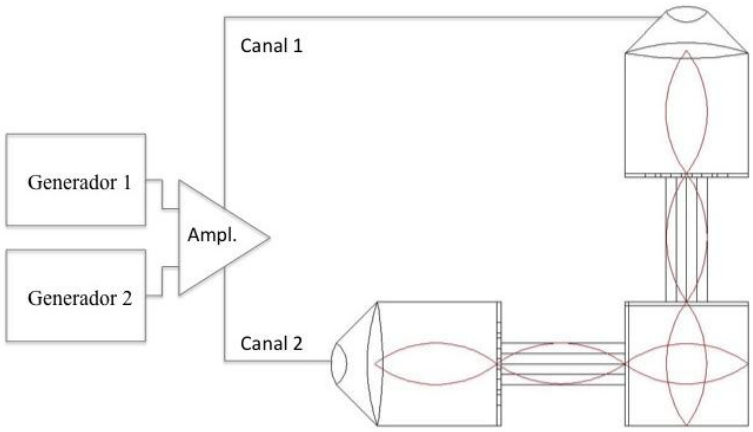


Figura 48. Diagrama de conexionado.

5.2 PRUEBA DEL SISTEMA

Para realizar la prueba del sistema conectado se tienen en cuenta, adicionalmente a la muestra original de diseño, otras muestras de distintas densidades, volúmenes y pesos.

Dichas muestras fueron piezas de espuma, vasos y esferas de poliestireno expandido, plumas, esferas y vasos plásticos.

Las características físicas de dichas muestras son:

	Longitud o diámetro (cm)	Densidad (kg/m3)	Peso (gramos)
Esfera de poliestireno	6	20	2.26
Vaso de poliestireno	8	20	1.3
Esfera de plástico	4	910	2.7
Vaso de plástico	10	910	1.6

Pluma	8.5	--	--
Espuma	3	25	0.5

Tabla 2. Tabla de características físicas de las muestras.

Al realizar la prueba generando como frecuencia experimental 580 Hz se obtuvieron los siguientes resultados:

	Resultado
Esfera de poliestireno	No levita
Vaso de poliestireno	No levita
Esfera de plástico	No levita
Vaso de plástico	No levita
Pluma	Levemente
Espuma	No levita

Tabla 3. Tabla de comportamiento de muestras a 580 Hz.

Al no obtener resultados satisfactorios se procede a realizar nuevamente la prueba en base a submúltiplos de la frecuencia original, buscando aprovechar el criterio de un aumento de

probabilidad de levitación exitosa a partir del aumento de la longitud de onda respecto a la muestra, obteniendo como resultados:

580 Hz, falta nivel de presión de sonora en la muestra.

290 Hz, falta nivel de presión de sonora en la muestra.

145 Hz, falta nivel de presión de sonora en la muestra.

72.5 Hz, la muestra se sitúa en el punto de nodo central y se evidencian las primeras muestras de levitación.

65 Hz, la muestra busca situarse en el punto de nodo central y se dan indicios de levitación.

58 Hz, la muestra levita con poca estabilidad alrededor del nodo central.

50 Hz, se encuentra el punto más estable del sistema.

Estas medidas son realizadas con el sistema en su punto de operación máximo:

Voltaje salida del generador: $2.89v$

Voltaje: $55v$

Corriente: $3.7\mathrm{A}$

Potencia: $203.5w$

$Lw = 133.08dB$

$$Lp = 126.43dB$$

Sobre la frecuencia de 50Hz, se observa un comportamiento mucho más cercano al objetivo, respecto a las muestras, de la siguiente forma:

	Resultado
Esfera de poliestireno	No levita
Vaso de poliestireno	Levita
Esfera de plástico	No levita
Vaso de plástico	Levita
Pluma	Levita
Espuma	Levita

Tabla 4. Tabla de comportamiento de muestras a 58 Hz

El comportamiento de las muestras es más positivo al reducir la frecuencia, sin embargo se presenta una levitación errática y poco constante. Para atenuar este comportamiento y obtener una levitación más constante se emplea finalmente una frecuencia de 50 Hz en ambos canales.

Al realizar las pruebas en esta frecuencia se obtienen los siguientes resultados:

	Resultado
Esfera de poliestireno	No levita
Vaso de poliestireno	Levita
Esfera de plástico	No levita
Vaso de plástico	Levita
Pluma	Levita
Espuma	Levita

Tabla 5. Tabla de comportamiento de las muestras a 50 Hz.

A pesar que los resultados son los mismos en términos del objetivo propuesto, es evidente una mejor respuesta de las muestras en 50Hz en aspectos como continuidad y estabilidad, presentando una trayectoria rotacional aunque inestable.

5.3 MEDICIÓN DE VOLTAJE

Para la medición de voltaje sobre los parlantes se realiza la conexión de acuerdo al siguiente diagrama:

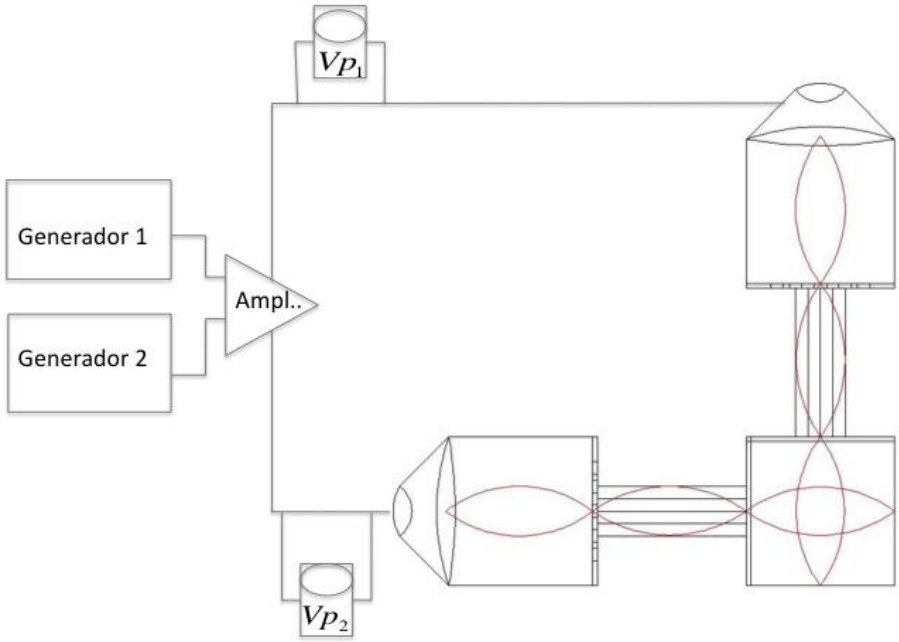


Figura 49. Diagrama de medición de voltaje.

Donde Vp1 y Vp2 son los puntos de medición de los multímetros.

Cabe aclarar que la medición se realiza a los niveles en los que se presenta el fenómeno de levitación a 50 Hz como frecuencia operativa, obteniendo los siguientes resultados por eje:

	Eje Y (Vertical)	**Eje X (Horizontal)**
Voltaje (volts)	33,65	14,8

Tabla 6. Medición de voltaje sobre cada eje.

5.4 MEDICIÓN DE CORRIENTE Y CALCULO DE POTENCIA

En el caso de la medición de corriente incidente en cada parlante representativo de su respectivo eje, se realiza el siguiente montaje en serie:

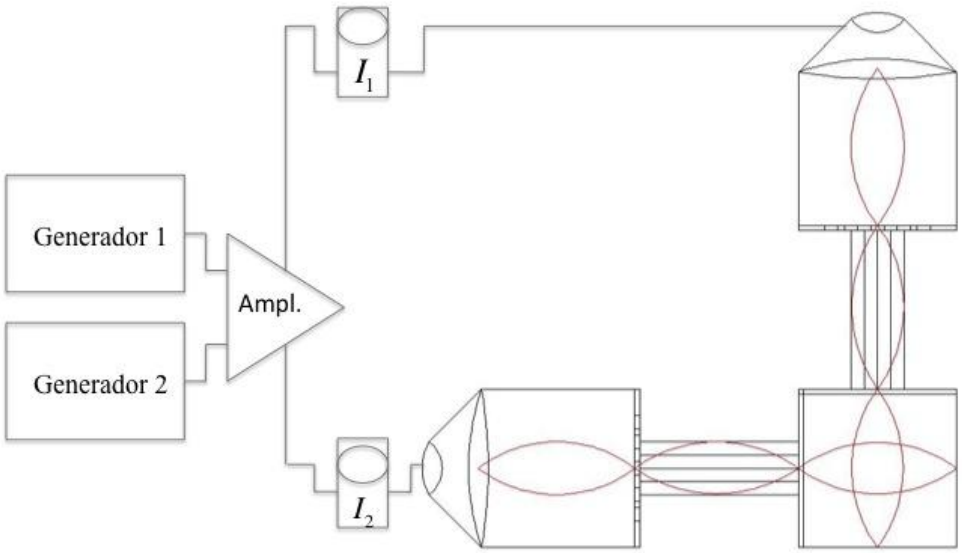


Figura 50. Diagrama de medición de corriente.

Donde I1, I2 son los puntos de medición de corriente de los multímetros, obteniendo los siguientes resultados para 50 Hz

	Eje Y (Vertical)	**Eje x (Horizontal)**
Corriente (amp)	2,5	1,38

Tabla 7. Medición de corriente sobre cada eje.

Con los datos de voltaje y corriente es posible calcular la potencia que actúa en el sistema obteniendo los siguientes valores:

	Eje Y (Vertical)	**Eje x (Horizontal)**
Potencia calculada (watts)	84,125	81,69

Tabla 8. Cálculo de la potencia sobre cada eje.

	Voltaje (v)	Corriente (A)	Potencia (W)	Lw (dB)	Lp (dB)
Vaso poliestireno	24.4	1.8	43.92	126.42	119.86
Espuma	55	3.7	203.5	133.08	126.43
Vaso de plástico	32	2.4	76.8	128.85	122.29
Pluma	40	3	120	130.79	124.22

Tabla 9. Mediciones de las pruebas de levitación exitosas.

5.5 CARACTERISTICAS DEL SISTEMA A 50 HZ

5.5.1 LONGITUD Y NUMERO DE ONDA DE 50 HZ:

$$\lambda = \frac{c}{f} \Rightarrow \lambda = \frac{344 m/s}{50 Hz}$$

$$\lambda = 6.88 mts$$

$$K = \frac{2\pi}{\lambda} \Rightarrow K = \frac{2\pi}{6.88 mts}$$

$$K = 0.91$$

5.5.2 MINIMO DE ENERGÍA ACÚSTICA REQUERIDO

$$\overline{E}_{\min} \approx (4\rho_1 g/5k) \Rightarrow \overline{E}_{\min} \approx \left(\frac{4(20 kg/m^3) \cdot 9.8(m/s^2)}{5(0.91)} \right)$$

$$\overline{E}_{\min} \approx 172.3 J$$

Convirtiendo a watts:

$$172.3J \approx 0.0478\ W \cdot h$$

Incorporándolo al nivel de potencia acústica (Lw):

$$Lw = 10 \cdot \log \frac{w_1}{w_0} \Rightarrow Lw = 10 \cdot \log \frac{0.0478 W \cdot h}{10^{-12} w}$$

$$Lw = 96.79 dB$$

Aplicando la relación entre el nivel de presión acústica y el nivel de potencia acústica:

$$Lp = Lw - 20 \log r - 11 (dB)$$

Donde, Lw es el nivel de potencia acústica y r es la distancia a la fuente emisora de sonido.

$$Lp = (96.79) - 20 \log(0.6m) - 11$$

$$Lp = 90.22 dB$$

Tomando el método de Gor'kov:

$$F_u = -\nabla U$$

$$F_u = -\nabla\left\{2\pi a^3 \rho\left[\frac{\left\langle p'^2_{in}\right\rangle}{3\rho^2 c^2} f_1 - \frac{\left\langle v'^2_{in}\right\rangle}{2} f_2\right]\right\}$$

Se obtiene:

$$f_1 = 1 - \frac{c^2\rho}{c_0^2 + \rho_0} \Rightarrow f_1 = 1 - \frac{(344m/s)^2 (1.2kg/m^3)}{(344m/s)^2 + (20kg/m^3)}$$

$$f_1 = 0.199$$

Donde: ρ densidad del fluido, ρ_0 densidad de la partícula, c^2 velocidad del sonido en el fluido, c_0^2 velocidad del sonido en la partícula.

$$\tilde{U}_{\max} = \frac{f_1}{3} \Rightarrow \tilde{U}_{\max} = \frac{0.199}{3}$$

$$\tilde{U}_{\max} = 0.66$$

Tomando este potencial en el tiempo aplicado al diseño:

$$Lw = 10 \cdot \log\frac{w_1}{w_0} \Rightarrow Lw = 10 \cdot \log\frac{0.66}{10^{-12} w}$$

$$Lw = 108.19$$

$$Lp = (108.19) - 20\log(0.6m) - 11$$

$$Lp = 123{,}62dB$$

Este será el SPL en su punto máximo, este no cambia debido a que es dependiente de las densidades y las velocidades, tanto de medio como de muestra.

5.5.3 COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA A 50 HZ

En la gráfica se muestra como la onda de 50 Hz se comporta dentro del levitador, en el que no alcanza a llegar a $\lambda/4$, punto de la onda de mayor presión.

Sin embargo, el sistema se ve afectado por el punto dentro de la longitud de onda en el cual la fuerza es ampliada (kh):

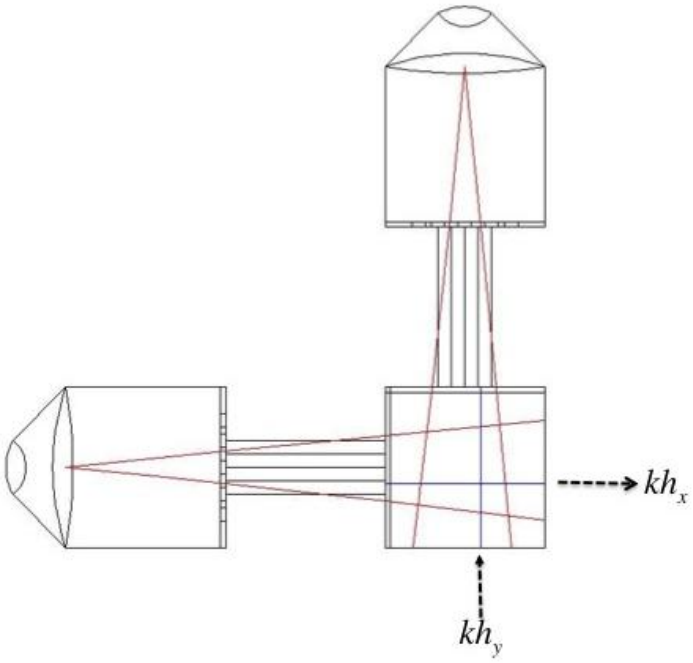


Figura 51. Comportamiento de la onda y puntos de ampliación de fuerza en cada eje.

$$kh = \frac{\pi}{4}$$

$$kh = 0.78m$$

En la cámara de largo (L) se analizan los máximos de levitación acústica en los nodos de presión, f=50Hz (representados en las líneas azules del anterior diagrama) arrojando los siguientes resultados:

$$L_1 = \lambda/8 \Rightarrow 6.88/8$$

$$L_1 = 0.86m$$

$$L_2 = 3\lambda/8 \Rightarrow 20.64/8$$

$$L_2 = 2.58m$$

$$L_3 = 5\lambda/8 \Rightarrow 34.4/8$$

$$L_3 = 4.3m$$

Debido a las dimensiones del dispositivo sólo se manifestará L_1:

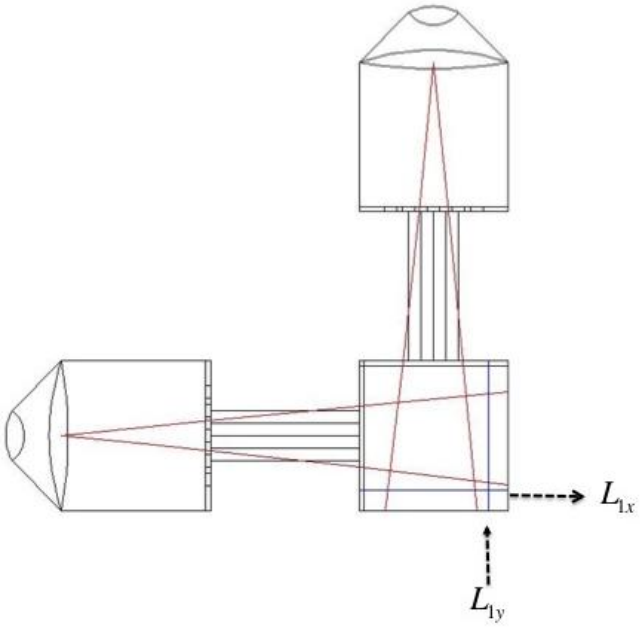


Figura 52. Puntos L1x y L1y dentro del dispositivo.

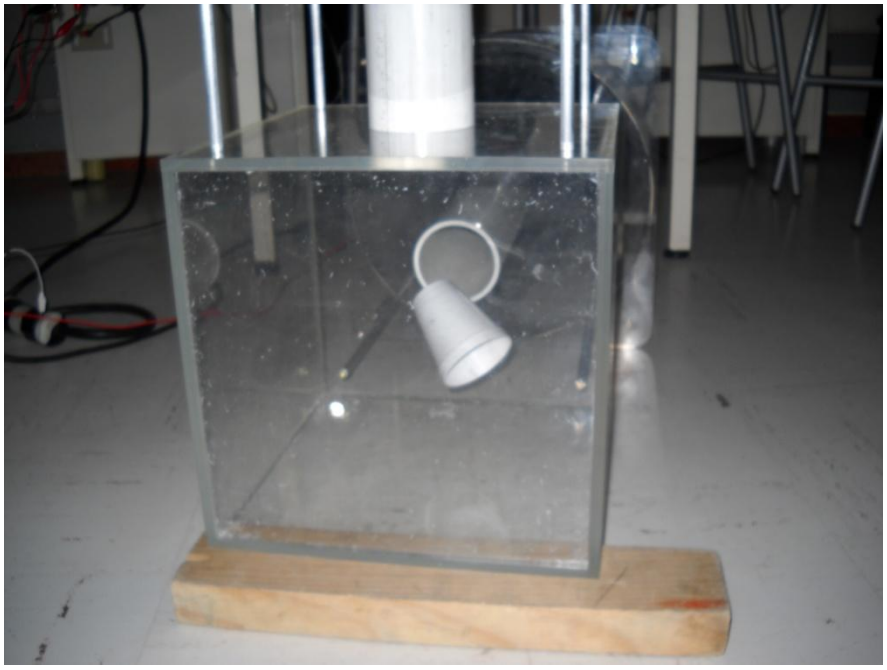


Figura 53. Levitación de vaso de poliestireno a 50 Hz

5.6 MEDICION DE SPL DEL DISPOSITIVO

Por medio de una medición de SPL se analiza el comportamiento del dispositivo en las frecuencias más importantes (50Hz – 580Hz) estas comparadas con una medición del comportamiento de los parlantes a campo abierto. Todas estas mediciones realizadas con los mismos parámetros usados para conseguir la levitación (potencia, corriente, voltaje).

5.6.1 MEDICIÓN A 50 HZ

En el levitador se da un aumento de la presión de sólo 4 dB´s para conseguir la cancelación de la gravedad. En el dispositivo se manifiesta una optimización no enfocada a los requerimientos de presión sino a sus dimensiones las cuales funcionan como una guía de onda, la cual enfoca la energía en función a la muestra.

5.6.1.1 MEDICION A CAMPO ABIERTO

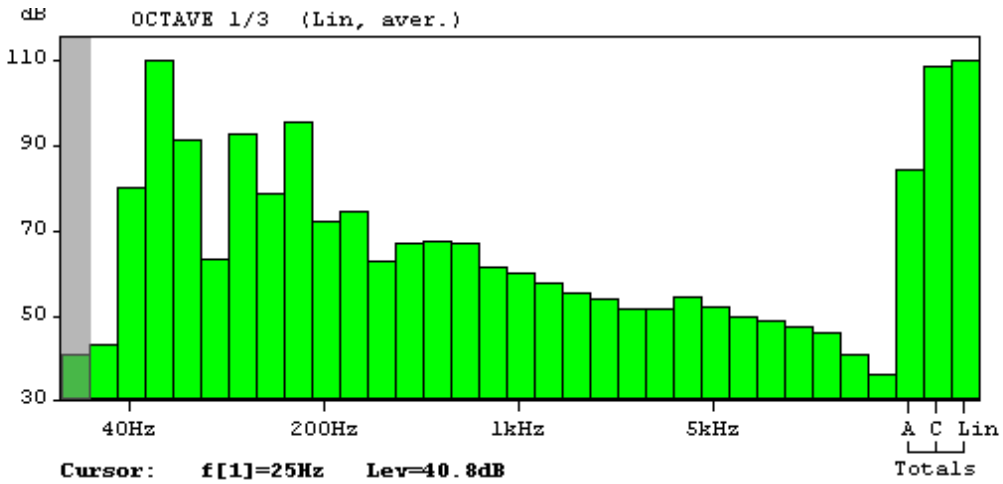


Figura 54. Medición a 50 Hz a campo abierto.

f[Hz]	Lev[dB]	f[Hz]	Lev[dB]	f[Hz]	Lev[dB]
25.0	40.8	315.0	63.0	4000.0	54.6
31.5	43.2	400.0	67.2	5000.0	52.0
40.0	80.1	500.0	67.4	6300.0	49.9
50.0	110.0	630.0	67.1	8000.0	48.9
63.0	91.5	800.0	61.3	10000.0	47.5
80.0	63.2	1000.0	59.9	12500.0	46.1
100.0	93.0	1250.0	57.9	16000.0	41.1
125.0	78.7	1600.0	55.3	20000.0	36.4
160.0	95.4	2000.0	54.0	TOT_A	84.2
200.0	72.2	2500.0	51.5	TOT_C	108.9
250.0	74.5	3150.0	51.5	TOT_Lin	110.2

Tabla 10. Medición a 50 Hz a campo abierto

5.6.1.2 MEDICION AL DISPOSITIVO

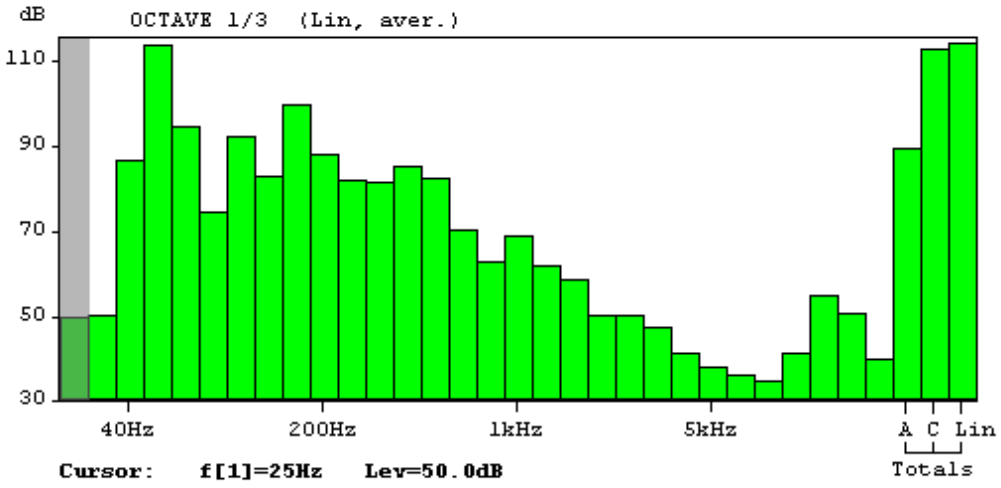


Figura 55. Medición a 50 Hz respecto al dispositivo

f[Hz]	Lev[dB]	f[Hz]	Lev[dB]	f[Hz]	Lev[dB]
25.0	50.0	315.0	81.7	4000.0	41.5
31.5	50.5	400.0	85.3	5000.0	38.4
40.0	86.7	500.0	82.5	6300.0	36.5
50.0	114.0	630.0	70.3	8000.0	34.8
63.0	94.5	800.0	63.1	10000.0	41.3
80.0	74.7	1000.0	69.2	12500.0	54.8
100.0	92.4	1250.0	62.1	16000.0	50.6
125.0	83.1	1600.0	58.5	20000.0	40.1
160.0	99.6	2000.0	50.2	TOT_A	89.5
200.0	88.2	2500.0	50.4	TOT_C	113.0
250.0	82.2	3150.0	47.7	TOT_Lin	114.2

Tabla 11. Medición a 50 Hz respecto al dispositivo

5.6.2 MEDICION A 580 HZ

Para esta frecuencia la muestra busca posicionarse en el punto de ubicación del nodo ($L_1 = 0.86m$) pero no logra fomentarse una fuerza que pueda contrarrestar la gravedad a pesar de los aumentos de presión hasta el punto máximo del equipo.

5.6.2.1 MEDICION A CAMPO ABIERTO

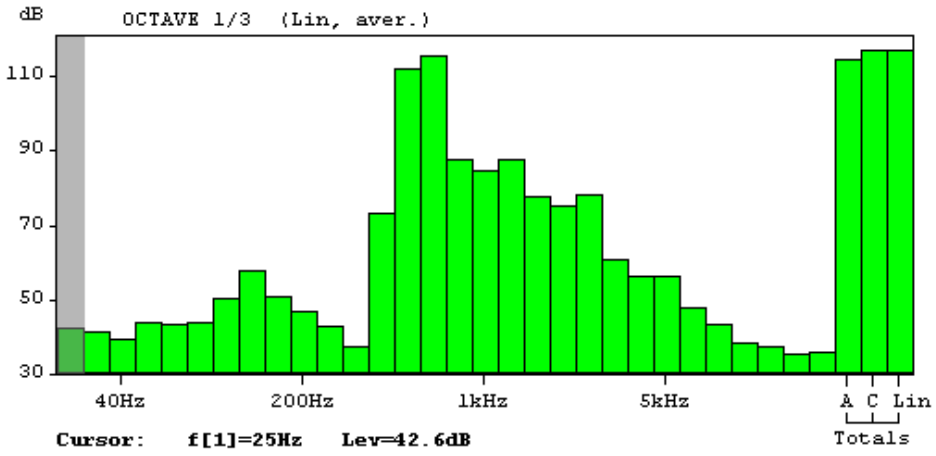


Figura 56. Medición a 580 Hz a campo abierto.

f[Hz]	Lev[dB]	f[Hz]	Lev[dB]	f[Hz]	Lev[dB]
25.0	42.6	315.0	37.7	4000.0	56.5
31.5	41.5	400.0	73.1	5000.0	56.4
40.0	39.5	500.0	111.8	6300.0	48.2
50.0	44.3	630.0	115.4	8000.0	43.5
63.0	43.4	800.0	87.6	10000.0	38.9
80.0	44.3	1000.0	84.7	12500.0	37.9
100.0	50.3	1250.0	87.6	16000.0	35.7
125.0	57.7	1600.0	77.6	20000.0	36.3
160.0	50.8	2000.0	75.3	TOT_A	114.5
200.0	46.9	2500.0	78.2	TOT_C	117.0
250.0	43.1	3150.0	61.0	TOT_Lin	117.0

Tabla 12. Medición a 580 Hz a campo abierto.

5.6.2.2 MEDICION AL DISPOSITIVO

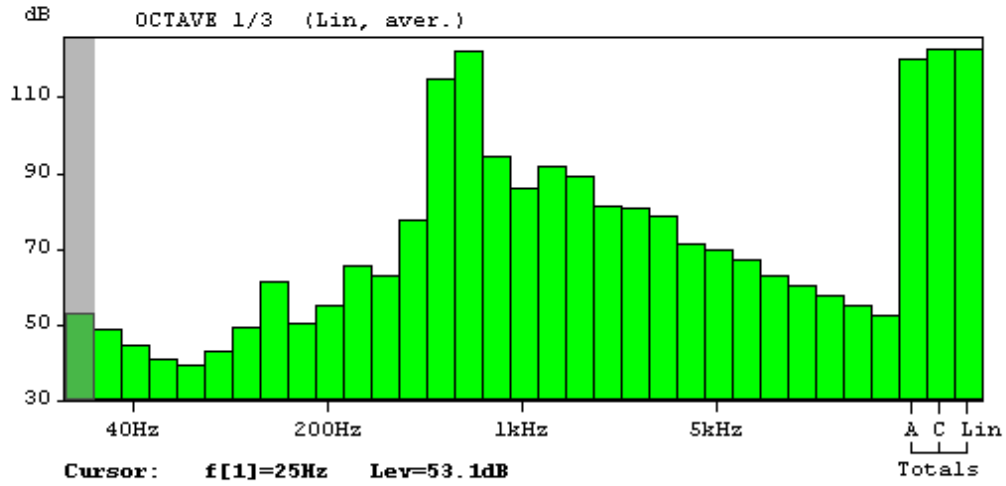


Figura 57. Medición a 580 Hz respecto al dispositivo

f[Hz]	Lev[dB]	f[Hz]	Lev[dB]	f[Hz]	Lev[dB]
25.0	53.1	315.0	63.4	4000.0	71.5
31.5	49.0	400.0	77.6	5000.0	69.9
40.0	44.8	500.0	114.6	6300.0	67.2
50.0	41.1	630.0	122.1	8000.0	63.3
63.0	39.5	800.0	94.5	10000.0	60.7
80.0	43.3	1000.0	86.1	12500.0	57.8
100.0	49.7	1250.0	91.6	16000.0	55.1
125.0	61.5	1600.0	89.4	20000.0	52.7
160.0	50.7	2000.0	81.3	TOT_A	120.3
200.0	55.3	2500.0	80.9	TOT_C	122.7
250.0	65.8	3150.0	78.9	TOT_Lin	122.7

Tabla 13. Medición a 580 Hz a campo abierto.

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En la frecuencia de 580 Hz, cuando se llega al punto de operación máxima del sistema, el nivel de presión reproducido (118.3 dB) no alcanza a ser el necesario (123.62 dB) debido a la falta de un encapsulamiento y aislamiento más propicio de la onda estacionaria producida dentro del sistema, dando como resultado fugas de presión a través de las paredes con la densidad y reflectividad correcta pero grosor insuficiente.

En la frecuencia de 50 Hz se logra llegar a un estado de levitación sin alcanzar el SPL calculado en su punto máximo (123.62 dB) ya que desde las fuentes se logran (110 dB) y contando con los incrementos producidos por el encapsulamiento del dispositivo (114 dB), lo cual indica una influencia en el aumento de la densidad en todo el sistema producido por frecuencias bajas, la cual se vuelve notoria sobre la muestra en su estado microgravitatorio.

Al excitar el sistema con una frecuencia de 50 Hz se puede notar cómo se produce un aumento de la presión en las frecuencias armónicas de su frecuencia de levitación calculada inicialmente (580 Hz) mostrando la influencia de estas sobre las dimensiones del dispositivo.

	80 Hz	125 Hz	315 Hz	500 Hz	1.2 KHz
Campo abierto (dB)	63.2	78.7	63	67.4	57.9
En el dispositivo (dB)	74.7	83.1	81.7	82.5	62.1
Incremento (dB)	11.5	4.4	18.7	15.1	4.2

Tabla 14. Comparación de incrementos de presión por armónicos.

7 COSTO DE LA PROPUESTA

En la siguiente tabla se relacionan los costos en los que se incurrió durante el desarrollo y elaboración del dispositivo propuesto.

RECURSO	COSTO
PLACA DE PLEXIGLASS	$ 410.000 PESOS
TUBERÍA DE PVC	$20.000 PESOS
PANELES DE FÓRMICA	$60.000 PESOS
PARLANTES	$450.000 PESOS
CABLES	$10.000 PESOS
TRANSPORTE	$100.000 PESOS
ENSAMBLE	$500.000 PESOS
TOTAL	$1´550.000 PESOS

Tabla 13. Costo de la propuesta.

8. CONCLUSIONES

- Se produjo levitación a 50 Hz con evidente facilidad respecto a 580 Hz, pese a que el dispositivo fue calculado a la segunda frecuencia en cuestión. Esto gracias a que es más importante excitar el recinto que influir la muestra, por ende las dimensiones del recinto y de la muestra son más importantes que la presión.

- Todos los átomos, y la 'materia' que forman mediante sus agrupaciones coherentes, vibran en diferentes rangos de frecuencia dependiendo de su propia complejidad y densidad; una frecuencia baja permite un conglomerado denso de átomos, una frecuencia más alta crea una materia menos densa, más espaciada hacia el exterior y más refinada, con las frecuencias bajas se produce una compresión del medio gaseoso (aire en este caso), una variación en el volumen pero no en la masa, teniendo como resultado una densidad mayor que la inicial la cual será la propicia para la levitación.

- Las frecuencias bajas son más prominentes a largas distancias, estas no se ven afectadas de gran manera por los cambios en el medio, por lo cual la excitación de la cámara se logrará más fácilmente con un menor nivel de presión sonora sin importar sus cambios de sección y de área en cada una de sus etapas.

- La estabilidad de la muestra no se logra debido a las tres dimensiones por las cuales está conformado el dispositivo. Al existir acción directa únicamente sobre dos de los tres planos axiales se observa una descompensación energética en el punto de equilibrio teórico, impidiendo la compensación de la muestra en suspensión.

- Los puntos máximos de levitación acústica de los nodos de presión L_{1x}, L_{1y} y el punto dentro de la longitud de onda en el cual la fuerza es ampliada ((kh)), son suficientes para contrastar la fuerza de la gravedad sin necesidad que la onda haya llegado a su punto de máxima presión $\lambda/4$.

- Las muestras con formas irregulares muestran un comportamiento más receptivo a la excitación en la cámara, esto debido a las variaciones de energía sobre sus superficies.

- Las láminas de plexiglass usadas en la construcción del aparato resultaron demasiado angostas para generar un encapsulamiento óptimo, lo que causa pérdidas de nivel de presión dentro de la cámara.

- Las muestras empleadas en este dispositivo, y que tuvieron un comportamiento favorable, presentan una densidad mínima de acción de 20 Kg/m3.

9. RECOMENDACIONES

- Se sugiere como mejora práctica la implementación de control sobre el tercer plano axial al dispositivo, esto con el fin de permitir una distribución más uniforme de energía sobre todos los planos de movimiento de la muestra y lograr un posicionamiento más controlado.

- Para la etapa de fabricación y ensamble, es altamente recomendable la implementación de placas plexiglass de un espesor mayor, así como la manufactura de la sección cilíndrica con material más denso y grueso, que permitan un mayor hermetismo y encapsulamiento de las ondas sonoras generadas dentro del dispositivo acústico.

- Para la operación del dispositivo a 580 Hz como frecuencia del sistema, se sugiere el uso de amplificadores y dispositivos que permitan una mayor generación de presión sonora efectiva.

- Se recomienda el uso de muestras de forma irregular para evidenciar de forma más clara el comportamiento levitatorio en caso de trabajar con 1 o 2 ejes debido a la imposibilidad de lograr una dispersión homogénea de la presión sobre una muestra de forma regular.

- Es extremadamente recomendable el uso de generadores de frecuencias que tengan una alta precisión de operación y no presenten rangos de variación, debido a los cambios de fase e interferencia que se generan.

- **BIBLIOGRAFÍA**

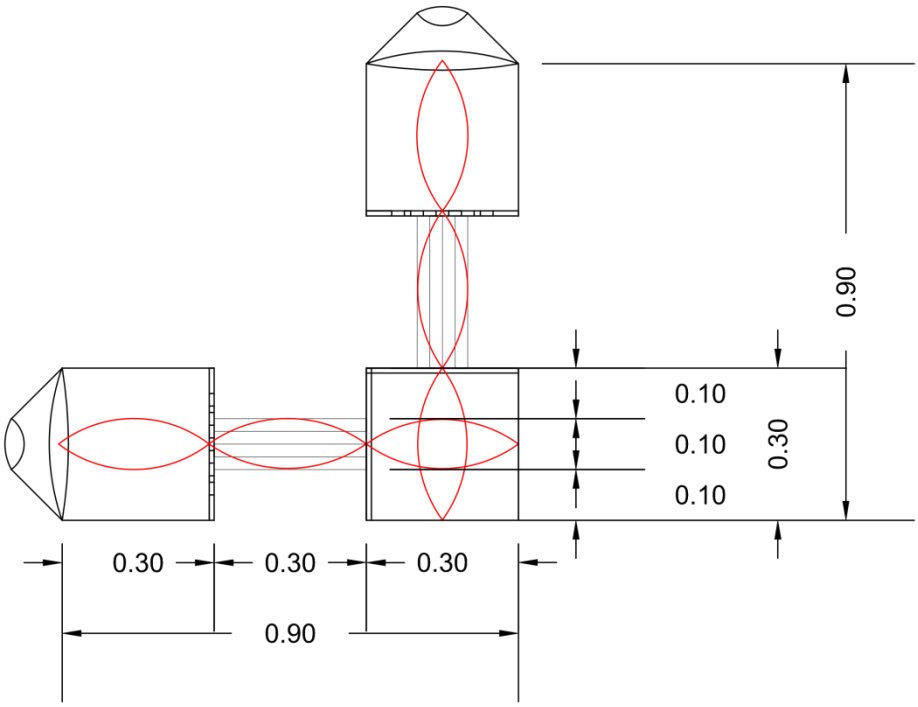
- [1] P. Collas, M. Barmatz (1986), *Acoustic radiation force on a particle in a temperature gradient,* California State University.
- [2] C. Shipley (1989), *Acoustic levitation in the presence of gravity,* California Institute of Technology.
- [3] Ueha Sadayuki (2001), *Phenomena, theory and applications of nearfield acoustic levitation,* Precision and Intelligence Laboratory, Tokyo Institute of Technology.
- [4] E.G. Lierke (2004), *Ultrasonic Levitator Manual,* Tec5USA Inc.
- [5] Mercedes López-Pastor (2006), *Containerless reaction monitoring in ionic liquids by means of Raman microspectroscopy,* Departamento de Química Analítica, Universidad de Córdoba.
- [6] Kamakura Laboratory (2006), *Ultrasound-Electronics and Electro-Acoustics,* University of Electro-Comunications Tokyo, Japan
- [7] R.J. Townsend (2006), *Investigation of two-dimensional acoustic resonant modes in a particle separator,* School of Engineering Sciences, University of Southampton.
- [8] Barmatz, M. (1984), *A new method for acoustic containerless processing of materials,* NASA Center: Jet Propulsion Laboratory.
- [9] Eberhardt, R. (1999), *Acoustic levitation device for sample pretreatment in microanalysis and trace analysis,* Institute of Physical and Chemical Analysis, Max-Planck-Strasse,
-
- [10] Ling, M. (2006), *Acoustic Levitator as a Tool for X Ray Tomography.*
- [11] Rosell, I. (2000), *Caracterización acústica de resonadores de Helmholtz,* Departamento de Acústica, Universitat Ramon Lull Barcelona, España
- [12] Hatano, H. (1994), *Axisymmetric Analysis of a Tube- Type Acoustic Levitator by a Finite Element Method,* University of Tokio, Japan.

- [13] Gonzalez Gómez, I. (2002), *Estudio experimental de mecanismos básicos de interacción acústica entre partículas en aerosoles,* Instituto de Acústica C.S.I.C, Madrid, España.

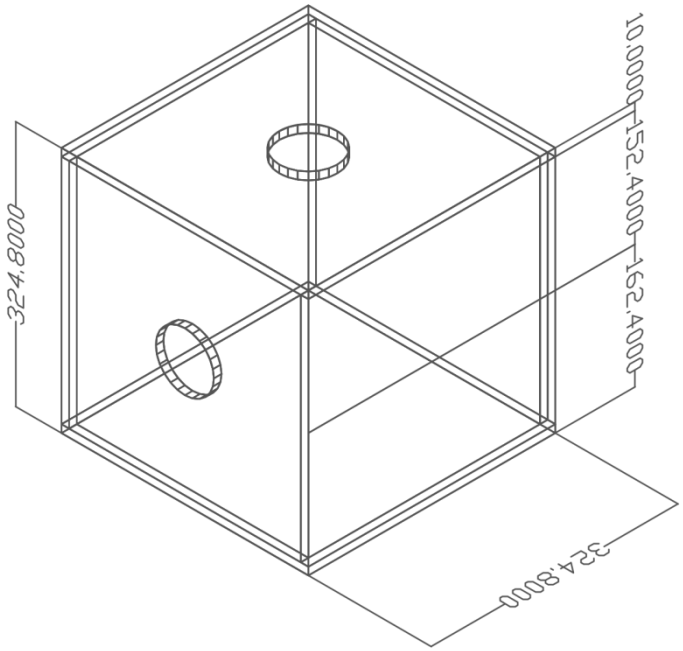
ANEXOS

ANEXO A

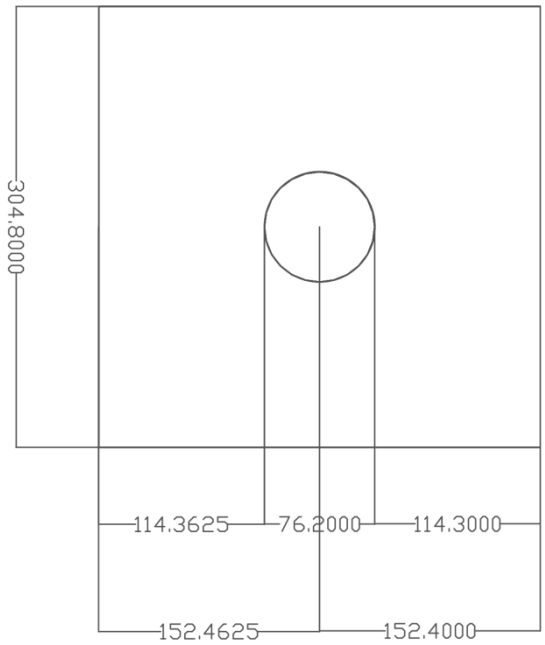
PLANOS TÉCNICOS DEL DISPOSITIVO



Vista general del dispositivo.



Isometría de cámara resonante y referencia a grosor de placas.



Plano de caras perforadas con acople de tubo.

ANEXO B

ESPECIFICACIONES CELESTION TRUVOX 1520

General specifications	
Nominal diameter (")	15
Power Rating (AES, W rms)	150
Nominal impedance (Ω)	8
Sensitivity (dB)	96
Chassis type	Pressed steel
Voice coil diameter (")	2
Surround material	Cloth-sealed
Magnet type	Ceramic
Magnet weight (oz)	40
Cone material	Paper
Frequency range (Hz)	45-4000
Resonance frequency, Fs (Hz)	45

Mounting Information	
Diameter (mm)	385
Overall depth (mm)	158
Cut out diameter (mm)	352
Mounting slot dimensions (mm)	9.4 X 6.3
Number of mounting slots	8
Mounting slot PCD (mm)	370
Unit weight (kg)	5.0

Thiele-Small Parameters

Mmt (g)	69.0
Qms	5.35
Qes	0.80
Qts	0.69
Re (Ω)	5.6
D (m)	0.33
Vas (L)	173.0
Magnet assembly flux (T)	1.20
BI (Tm)	12.0
Cms (mm/N)	0.2
RMS (kg/s)	3.8
Xmax (mm)	3.0
f/p (mm)	6.0
coil (mm)	12.0[20]

[20] http://professional.celestion.com/pro/pdf/TF1520.pdf

ANEXO C

Especificaciones generador Peaktech 4025

Waveform characteristics

Waveform types: 16 types including sine, square, triangle, ramp and so on

Waveform length: 1024 points, Sampling rate: 100 MSa/s

Amplitude resolution: 8 bits

Harmonic distortion: ≥40dBc (<1MHz) (P 4025)

≥35dBc (1MHz ~ 10MHz) (P 4030)

Total distortion: ≤1% (20Hz ~ 200kHz)

Pulse, square: rise/fall time: ≤35ns, over pulse: ≤ 10 %

Duty cycle: 1% ~ 99%

Frequency characteristics

Frequency range: sine: 40mHz ~ 5 Mhz (P 4025)

40mHz ~ 20 MHz (P 4030)

Resolution: 40mHz

Frequency accuracy: ±(5×10-5+ 40mHz)

Frequency stability: ±5×10-6 / 3hrs

Amplitude characteristics

Amplitude range: 2mVpp ~ 20Vpp (High impedance, for frequency ≤10MHz)

2mVpp ~ 10Vpp (High impedance, for frequency >10MHz <15MHz)

Resolution: 20mVpp (for amplitude>2V), 2mVpp(for amplitude <2V)

Amplitude accuracy: ±(1% + 2mV)(high impedance, virtual value, frequency is 1kHz)

Amplitude stability: ±0,5%/ 3hrs

Amplitude flatness: ±5% (for frequency≤1MHz),

±10% (1MHz< for frequency ≤10MHz)

±20% (10MHz< for frequency ≤20MHz)

Output impedance: 50W

Offset characteristics: (for the attenuation of 0dB)

Offset range: ±10V (high impedance), Resolution: 20mV

Offset accuracy: ±(1% + 20mV)

Sweeping characteristics: linear frequency sweeping

Sweeping range: the start/end point can be set arbitrarily

Sweeping step: any value greater than the resolution

Sweeping rate: 10ms ~ 60s/ step

Sweeping mode: positive, negative, to-and-fro

Frequency modulation characteristics

Carrier signal: Channel A

Modulation signal: interior signal of channel B or exterior signal

Frequency deviation

modulation: 0% ~ 10%[21]

[21] http://www.peaktech.de/productdetail/kategorie/dds-funktionsgeneratoren/produkt/p-4025.html

ANEXO D

ESPECIFICACIONES CREST AUDIO CA 4

Current Draw: 6.8 Amperes

Damping Factor: 550:1 @ 8 Ohms

Dimensions (W-D-H): 19 x 18 x 3.5 Inches

Distortion: <0.03 SMPTE-IM

Frequency Response: 20Hz - 20kHz

Input Connectors: XLR & TRS

Input Impedance Balanced: 20 k ohms

Input Impedance Unbalanced: 10 k ohms

Output Circuitry: Class AB

Output Connectors: 5-Way Binding Posts or Speakon

Power Rating 2 Ohm Stereo: 500 Watts

Power Rating 4 Ohm Bridge: 1000 Watts

Power Rating 4 Ohm Stereo: 435 Watts

Power Rating 8 Ohm Bridge: 830 Watts

Power Rating 8 Ohm Stereo: 250 Watts [22]

[22] http://www.crestaudio.com/products/browse.cfm/action/detail/item/116223/number/CFA-CA4-AB/cat/319/CA%204.cfm

ANEXO E

CONFIGURACIÓN DEL SONÓMETRO DURANTE LAS MEDICIONES:

Header information:

Device type	SVAN 943A
Serial No.	5183
Internal software version ...	5.11
File system version	5.11
Original file name	@TL_126
Measurement hour	15:50'36
Measurement day	10/10/13
Device function	OCTAVE 1/3

Title text:

Input	Microphone
Mic. polarization	0 V
Measurement range	130 dB
Leq integration	Linear
Trig. mode	Off
Start delay	5 s
Integration time def.	30 s
Repetition cycle	1
Octave 1/3 lines	30+3
Octave 1/3 filter	Lin
Octave 1/3 in buffer	ON
Number of histograms	3+33
Calibration type	Sensitivity
Calibration time	17:57'08
Calibration date	10/10/12
Rotation measurement	OFF

Profile:	#1	#2	#3
Weighting filter	Lin	A	C
Detector type	Fast	Slow	Slow
Buffer contents definition ..	RMS	RMS	RMS
Calibration factor	-0.1 dB	-0.1 dB	-0.1 dB